

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



GRADO INGENIERÍA DE SISTEMAS DE COMUNICACIONES

DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA

TRABAJO FÍN DE GRADO

**FUENTE DE LUZ MULTILAMBDA PARA
APLICACIONES DE SENSADO Y
COMUNICACIONES ÓPTICAS**

Autor: Estefanía Crespo Bardera

Tutor: Alberto Tapetado Moraleda

Septiembre 2014



Agradecimientos

En primer lugar me gustaría dar las gracias a mis padres, por su dedicación y comprensión, por haber estado ahí siempre que lo he necesitado, por esas palabras de apoyo tan necesarias en algunos momentos. A mi hermana Noelia por haber compartido conmigo infinidad de momentos que jamás olvidaré.

Gracias a todas aquellas personitas que de una manera u otra a lo largo de estos años de carrera han acabado en mi camino, especialmente a ti Jesús. No me olvido, de todos aquellos que ya estabais antes de comenzar esta aventura y que todavía seguís compartiendo mis ilusiones, gracias a mis chicas de Navalacruz.

Por último, agradecer a mi tutor Alberto Tapetado su paciencia, ayuda y dedicación, ya que sin él este proyecto nunca habría sido posible.



Resumen

El objetivo de este trabajo final de grado es dar solución a la actual demanda de fuentes de luz sintonizables y de múltiples longitudes debido al gran interés que despiertan en diferentes campos como los sistemas de multiplexación por división en longitud de onda (WDM), las redes de sensores, la calibración de instrumentos ópticos o la espectroscopia de alta definición.

En la primera parte, se propone el desarrollo experimental de una fuente de luz multilambda en configuración de anillo. Esta configuración está basada en multiplexores y demultiplexor (MUX/DEMUX) y emplea redes de difracción de Bragg (FBGs) para seleccionar las longitudes de onda de operación. Se han obtenido dos líneas de emisión simultáneas con una OSNR (Optical Signal to Noise Ratio) de 20dB. Además, se ha logrado una buena estabilidad del sistema obteniendo fluctuaciones de potencia de 0.1dB.

La segunda parte del proyecto se basa en incorporar a la fuente de luz multilambda un sistema de sintonización que ofrezca una mayor libertad a la hora de ajustar la fuente de luz. Existen numerosos dispositivos comerciales destinados al sensado óptico que trabajan fuera del rango estandarizado de trabajo de los sistemas WDM. Por este motivo, una fuente multilambda sintonizable resulta de especial importancia. El sistema diseñado utiliza los desplazamientos que experimenta la longitud de onda central de la FBG con la temperatura. El desarrollo que se plantea se caracteriza por su bajo coste y por tanto, el rango de sintonización no se puede comparar con sistemas comerciales. El sistema de control de la temperatura permite rangos de sintonización de 3.6 nm a partir de la longitud de onda central a temperatura ambiente.

Palabras clave: emisión multilambda, configuración en anillo, redes de difracción de Bragg, estabilidad, sintonización, temperatura.



Abstract

The aim of this bachelor thesis is to provide a solution to the current demand for tunable and multi-wavelengths light sources, which are of great importance in different applications such as WDM (Wavelength-Division Multiplexing) systems, sensor networks, calibration of optical instruments or high definition spectroscopy.

In the first part of the thesis, the experimental development of a multi-wavelength ring light source configuration is proposed. This configuration is based on multiplexers and demultiplexers and employs fiber Bragg gratings (FBGs) to select desired operation wavelengths. Two emission lines have been obtained simultaneously showing an OSNR value of 20dB. Besides, good stability has been managed demonstrating power variations of 0.1dB.

The second part of the thesis is based on incorporating a tunable system that provides greater freedom adjusting the light source into the multiwavelength light source developed in the first part. There are many commercial devices used in optical sensing that work out of the standardized working range of the WDM systems. For this reason, a tunable multi-wavelength light source is especially important. The designed system is based on the shift in the Bragg wavelength due to temperature changes. The presented development is characterized by its low cost and therefore, the tuning range can't be compared with the ones offered by commercial systems. The temperature control system allows tuning ranges of 3.6 nm from the central wavelength at room temperature.

Key words: multiwavelength emission, ring configuration, fiber Bragg grating (FBG), stability, tuning, temperature.



Índice general

| | |
|---|-----------|
| Capítulo 1 Introduction | 1 |
| 1.1. Objectives..... | 2 |
| Capítulo 2 Estado del arte | 3 |
| 2.1. Introducción | 3 |
| 2.2 Soluciones desarrolladas | 3 |
| 2.3.Solución propuesta | 8 |
| Capítulo 3 Desarrollo teórico de la fuente de luz multilambda..... | 10 |
| 3.1 Fibra óptica..... | 10 |
| 3.2. Fuente óptica de ancho espectro..... | 12 |
| 3.3. Acopladores..... | 12 |
| 3.4. Multiplexores y Demultiplexores ópticos | 14 |
| 3.5. Atenuador óptico variable | 15 |
| 3.6. Circulador óptico..... | 16 |
| 3.7. Aislador óptico | 18 |
| 3.8. Amplificador óptico semiconductor | 19 |
| 3.9. Redes de difracción de Bragg..... | 21 |
| Capítulo 4 Desarrollo experimental de la fuente de luz multilambda | 25 |
| 4.1 Descripción del montaje experimental | 25 |
| 4.2. Caracterización de equipos y dispositivos ópticos | 26 |
| 4.2.1. Fuente de luz de Ancho Espectro | 26 |
| 4.2.2. Demultiplexor por longitud de onda ligera | 27 |
| 4.2.3. Atenuador óptico variable | 29 |
| 4.2.4. Multiplexor por longitud de onda ligera..... | 31 |
| 4.2.5. Redes de difracción de Bragg..... | 33 |
| 4.2.6. Circuladores ópticos | 34 |



| | |
|--|-----------|
| 4.2.7. Amplificador óptico semiconductor | 37 |
| 4.2.8. Acoplador 2x2 | 39 |
| 4.3 Monitorización del espectro de salida de los elementos del sistema..... | 40 |
| 4.3.1. Salida de la fuente de ancho espectro..... | 41 |
| 4.3.2 Salida del puerto 2 del circulador óptico | 42 |
| 4.3.3. Espectro de salida del acoplador | 42 |
| 4.3.4. Salida del demultiplexor. Canales centrados en 1530 y 1550 nm | 43 |
| 4.3.5. Salida del multiplexor | 44 |
| 4.3.6. Salida del puerto 3 del circulador óptico | 45 |
| 4.3.7. Salida del amplificador óptico semiconductor | 46 |
| 4.3.8. Salida del sistema completo | 47 |
| 4.4 Resultados experimentales | 47 |
| 4.4.1. Ecualización | 48 |
| 4.4.2. Estabilidad..... | 48 |
| 4.5 Estudio de potencia | 51 |
| 4.5.1. Primer escenario..... | 51 |
| 4.5.2. Segundo escenario..... | 52 |
| 4.5.3. Tercer escenario | 54 |
| Capítulo 5 Capacidad de sintonización usando FBGs | 56 |
| 5.1 Fundamentos teóricos..... | 56 |
| 5.2 Instrumentación virtual | 57 |
| 5.2.1 Software LabVIEW de National Instruments | 57 |
| 5.3 Desarrollo experimental | 59 |
| 5.3.1 Descripción del montaje experimental | 59 |
| 5.3.2 Caracterización de las FBGs aplicando variaciones de temperatura..... | 60 |
| 5.3.3 Descripción del programa usado para automatizar la sintonización | 61 |
| 5.3.4 Resultados experimentales | 64 |
| Capítulo 6 Conclusions and future reseach lines..... | 66 |
| 6.1 Conclusions | 66 |



| | |
|--|-----------|
| 6.2 Future research lines..... | 67 |
| Capítulo 7 Historia del proyecto | 68 |
| 7.1 Estructura del documento..... | 68 |
| 7.2 Planificación del proyecto..... | 69 |
| Capítulo 8 Presupuesto | 72 |
| CAPÍTULO 1. MATERIAL DEL SISTEMA..... | 72 |
| CAPÍTULO 2. INSTRUMENTACIÓN..... | 75 |
| CAPÍTULO 3. EQUIPOS INFORMÁTICOS | 76 |
| CAPÍTULO 4. PERSONAL | 77 |
| Capítulo 9 Regulación..... | 79 |
| Referencias..... | 81 |
| Anexos | 84 |
| A1. Hojas de especificaciones de equipos | 84 |
| A2. Front panel y block diagram de la aplicación de sintonización..... | 102 |



Índice de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 2.1. Arreglo experimental del láser de fibra con emisión dual seleccionable usando rejillas de Bragg de fibra y fibra dopada con erbio | 4 |
| Figura 2.2. EDFRL con filtrado en serie..... | 5 |
| Figura 2.3. Láser multilambda usando FPF | 5 |
| Figura 2.4. Láser en anillo usando LPFGs | 6 |
| Figura 2.5. Configuración en anillo usando LOAs | 6 |
| Figura 2.6. Montaje experimental del láser en anillo con EDF..... | 6 |
| Figura 2.7. Configuración láser sintonizable en anillo..... | 7 |
| | |
| Figura 3.1. Estructura de una fibra óptica | 10 |
| Figura 3.2. Acoplador 2x2 | 12 |
| Figura 3.3. Divisor en Y | 13 |
| Figura 3.4. Acoplador Combinador en Y..... | 13 |
| Figura 3.5. Acoplador en estrella 8x8 | 13 |
| Figura 3.6. Acoplador 2x2 con $k=90:10$ | 14 |
| Figura 3.7. Símbolo del multiplexor | 14 |
| Figura 3.8. Símbolo del demultiplexor | 14 |
| Figura 3.9. Símbolo del atenuador óptico variable | 16 |
| Figura 3.10. Símbolo del circulador óptico..... | 16 |
| Figura 3.11. Configuración interna de un circulador óptico | 17 |
| Figura 3.12. Símbolo del aislador óptico | 18 |
| Figura 3.13. Configuración interna de un aislador óptico..... | 18 |
| Figura 3.14. Proceso de emisión estimulada | 19 |
| Figura 3.15. Estructura de un Amplificador óptico semiconductor | 20 |
| Figura 3.16. Esquema de funcionamiento de una red de Bragg..... | 21 |
| Figura 3.17. Red de Bragg Uniforme | 22 |
| Figura 3.18. Red de Bragg Apodizada | 22 |
| Figura 3.19. Red de Bragg con periodo variable (chirped) | 22 |
| Figura 3.20. Posible esquema de la técnica interferométrica para la grabación de redes de Bragg chirpeadas sobre fibra óptica. | 23 |
| Figura 3.21. Posible esquema de la técnica punto por punto para la grabación de redes de Bragg sobre fibra óptica | 23 |



| | |
|---|----|
| Figura 3.22. Posible esquema de la técnica de máscara de fase para la grabación de redes de Bragg sobre fibra óptica | 24 |
| Figura 4.1. Montaje experimental de la fuente de luz multilambda | 25 |
| Figura 4.2. Espectro de emisión de la fuente de ancho espectro utilizada en el experimento ... | 27 |
| Figura 4.3. Demultiplexor | 28 |
| Figura 4.4. Espectro de los cuatro canales de demultiplexación. | 28 |
| Figura 4.5. Atenuador óptico variable..... | 30 |
| Figura 4.6. Atenuación aplicada frente al número de vueltas del atenuador óptico variable situado en el canal de longitud de onda de 1530 nm. | 31 |
| Figura 4.7. Atenuación aplicada frente al número de vueltas del atenuador óptico variable situado en el canal de longitud de onda de 1550 nm. | 31 |
| Figura 4.8. Espectro característico del multiplexor CWDM..... | 32 |
| Figura 4.9. Red de difracción de Bragg | 33 |
| Figura 4.10. Espectros de caracterización de las redes de Bragg en reflexión (a) y (c) y en transmisión (b) y (d) a 1530.3 y 1552.5 nm | 34 |
| Figura 4.11. Circulador óptico de tres puertos | 34 |
| Figura 4.12. Espectro óptico de los puertos 2 y 3 del circulador | 35 |
| Figura 4.13. Circulador óptico de tres puertos | 36 |
| Figura 4.14. Espectro óptico de los puertos 2 y 3 del circulador | 36 |
| Figura 4.15. Amplificador óptico semiconductor, Alphion SAC20m 07p427 | 37 |
| Figura 4.16. Espectro completo a la salida del Amplificador óptico semiconductor..... | 38 |
| Figura 4.17. Espectro a la salida del Amplificador óptico semiconductor en función de la corriente de bombeo concretado en el rango espectral de la fuente de luz multilambda | 38 |
| Figura 4.18. Acoplador óptico | 39 |
| Figura 4.19. Espectro óptico de los puertos de salida del acoplador. Espectro de la fuente de ancho espectro utilizada para caracterizar el dispositivo | 40 |
| Figura 4.20. Esquema de la configuración experimental de la fuente de luz multilambda..... | 41 |
| Figura 4.21. Espectro visualizado en el punto A..... | 41 |
| Figura 4.22. Espectro visualizado en el punto B..... | 42 |
| Figura 4.23. Espectro visualizado en el Punto C..... | 43 |
| Figura 4.24. Espectro visualizado en el punto D..... | 44 |
| Figura 4.25. Espectro visualizado en el punto E..... | 44 |
| Figura 4.26. Espectro visualizado en el punto F | 45 |
| Figura 4.27. Espectro visualizado en el Punto G | 46 |
| Figura 4.28. Espectro visualizado en el Punto H | 46 |



| | |
|--|----|
| Figura 4.29. Espectro visualizado en el Punto I..... | 47 |
| Figura 4.30. Valores de inestabilidad del acoplador 90:10 | 48 |
| Figura 4.31. Valores de inestabilidad del acoplador 50:50 | 49 |
| Figura 4.32. Valores de inestabilidad del acoplador 10:90 | 50 |
| Figura 4.33. Comparación del espectro de la fuente de luz multilambda usando cada acoplador | 51 |
| Figura 4.34. Señal óptica de salida del primer escenario | 52 |
| Figura 4.35. Montaje del segundo escenario..... | 53 |
| Figura 4.36. Señal óptica de salida del segundo escenario | 53 |
| Figura 4.37. Montaje del tercer escenario. | 54 |
| Figura 4.38. Señal óptica de salida del tercer escenario..... | 54 |
| | |
| Figura 5.1. Ejemplo de programa en LabVIEW. Panel frontal a la izquierda y diagrama de bloque a la derecha..... | 58 |
| Figura 5.2. Icono (izquierda) y panel de conexión (derecha) de un VI..... | 59 |
| Figura 5.3. Montaje experimental del estudio de sintonización..... | 59 |
| Figura 5.4. Visualización del desplazamiento del espectro de la reflexión de la red de Bragg en función de la temperatura..... | 60 |
| Figura 5.5. Longitud de onda vs Temperatura | 61 |
| Figura 5.6. Diagrama de flujo de la aplicación desarrollada..... | 63 |
| Figura 5.7. Espectro de la reflexión de la FBG sintonizado a distintas longitudes de onda | 64 |
| | |
| Figura 7.1. Diagrama de Gantt del proyecto..... | 70 |
| Figura 7.2. Tareas críticas del proyecto. | 71 |



Índice de Tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 4.1. Características principales del demultiplexor CWDM..... | 29 |
| Tabla 4.2. Características principales del multiplexor CWDM..... | 32 |
| Tabla 4.3. Parámetros característicos del sistema usando acoplador 90:10: potencia media, mínima, máxima y desviación típica..... | 49 |
| Tabla 4.4. Parámetros característicos del sistema usando acoplador 50:50: potencia media, mínima, máxima y desviación típica..... | 50 |
| Tabla 4.5. Parámetros característicos del sistema usando acoplador 10:90: potencia media, mínima, máxima y desviación típica..... | 51 |
| | |
| Tabla 9.1. Clasificación de sistemas láser y riesgos derivados. | 80 |
| Tabla 9.2. Clasificación de luz no coherente y riesgos derivados..... | 80 |



Lista de Acrónimos / Acronyms List

| <i>Acrónimo</i> (Acronym) | <i>Término en Inglés</i> (English Term) | <i>Término en Castellano</i> (Spanish Term) |
|------------------------------|---|--|
| ASE | Amplified Spontaneous Emission | Emisión Espontánea Amplificada |
| BLS | Broadband Light Source | Fuente de Ancho Espectro |
| CWDM | Coarse Wavelength Division Multiplexing | Multiplexación en Longitud de Onda Aproximada |
| dB | Decibel | Decibelio |
| DMUX | Demultiplexer | Demultiplexor |
| DWDM | Dense Wavelength Division Multiplexing | Multiplexado Denso en Longitud de Onda |
| EDF | Erbium Doped Fiber | Fibra dopada con erbio |
| EDFA | Erbium Doped Fiber Amplifier | Amplificador de Fibra Dopada con Erbio |
| FBG | Fiber Bragg Grating | Red de difracción de Bragg en fibra |
| FFP | Fabry-Perot Filter | Filtro Fabry-Pérot |
| FWHM | Full Width at Half Maximum | Anchura a media altura |
| ITU | International Telecommunication Union | International Telecommunication Union |
| ITU-T | ITU Telecommunication Standardization Sector | Sector de Estandarización de las Telecomunicaciones de la ITU |



| | | |
|--------------|---|--|
| LASER | Ligh Amplification by Stimulated Emission of Radiation | Láser |
| LED | Light Emiting Diode | Diodo emisor de luz |
| LOA | Linear Optical Amplifier | Amplificador óptico lineal |
| LPFG | Long Period Fiber Grating | Rejilla de periodo largo en fibra |
| MUX | Multiplexer | Multiplexor |
| nm | Nanometer | Nanómetro |
| OSA | Optical Spectrum Analyzer | Analizador de Espectros Óptico |
| OSNR | Optical Signal to Noise Ratio | Relación señal a ruido Óptica |
| POF | Plastic Optical Fiber | Fibra óptica de plástico |
| SLD | Superluminescent Diode | Diodo Superluminescente |
| SMF | Single Mode Fiber | Fibra monomodo |
| SOA | Semiconductor Optical Amplifier | Amplificador óptico semiconductor |
| VOA | Variable Optical Attenuator | Atenuador óptico variable |
| WDM | Wavelength Division Multiplexing | Multiplexado por división de longitud de onda |

Capítulo 1

Introduction

The photonic technologies field has been increased in recent decades due to a high demand for data transmission capacity mainly derivated from the emergence of High Definition Television (HDTV), Video on Demand (VoD), Cloud Storage and File Sharing Programs (P2P). This fact has generated that optical communications have gained big prominence. To solve the problem of bandwidth generated by the increase of data traffic in the communication network, the current communication system based on coaxial cable is being progressively replaced by communication systems based on optical fiber. These systems allow obtaining a higher bandwidth than current standards on copper twisted pair.

In order to increase the bandwidth of the current communication system and the number of users, several passive techniques known as “Multiplexing techniques” are being implemented. These techniques are based on increase exponentially the number of users exponentially to whom offering the service, increase the efficiency and reduce the cost of installation and maintenance associated with this type of technology. The principle of operation consists on divide a physical channel into many logical channels in order to transmit the independent signals simultaneously. Many multiplexing techniques have been proposed and developed, being the time division (TDM, Time Division Multiplexing), the frequency division (FDM, Frequency Division Multiplexing) or the wavelength division (WDM, Wavelength Division Multiplexing) the most used in current communication systems.

Currently, communication networks incorporate topologies based on WDM technology, such as Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM) or Coarse Wavelength Division Multiplexing (CWDM) allowing schemes much more efficient than other proposals. This type of technologies are commonly known as WDM-PON networks (Wavelength Division Multiplexing-Passive Optical Network).

Nowadays, the using of the WDM-PON technology in intensity-modulated sensing systems is increasing. These systems, which are integrated by several optical fiber sensors, are based on intensity light changes to sense a physical magnitude. The wavelength multiplexing topology would serve to interrogate each sensor individually. In addition, among the main advantages stand out the low cost of implementation and the use of a self-reference system which avoids possible interferences produced by the fluctuations of the light source.

Sensing and communication systems based on WDM-PON topologies have improved the development of light sources, especially the ones which offer multiple output emission lines simultaneously. These light sources have to be compliant with WDM bandwidth standards (CWDM and DWDM). Furthermore, a high power light source is required to establish communication channels of hundreds of kilometres with low cost requirements.

1.1. Objectives

Different academic aims have been achieved during the project performance. The student has been able to analyse the characteristics and properties of optical devices, as well as the acquisition of working autonomy in the optoelectronics laboratory. A large searching has been carried out to show a wide State-of Art. Different alternatives have been analysed and justified in comparison with the proposed system.

Another study to be carried out is the possibility of incorporate the tuning functionality of each emission line of the multiwavelength light source, taking advantage of certain properties of the elements that are part of the initially proposed system. This initiative proposes to cover the range of communications devices that do not incorporate the WDM-PON channels standard

Capítulo 2

Estado del arte

2.1. Introducción

La tecnología de multiplexación por división de longitud de onda (WDM, Wavelength Division Multiplexing) se ha consolidado poco a poco hasta formar parte de los sistemas y las redes de transmisión que actualmente se despliegan en todo el mundo. Al mismo tiempo que continúa incrementándose el número de canales a lo largo del espectro desde la banda S hasta la banda L, también lo hace el interés por las fuentes láser con emisión simultánea de múltiples longitudes de onda. Son muchas las aplicaciones de este tipo de fuentes láser en diferentes campos, transmisores en los sistemas WDM, en redes de sensores, para calibrar instrumentos ópticos o para sustituir un número equivalente de fuentes láser discretas o fuentes láser sintonizables reduciendo así costes e incluso la complejidad de determinados procedimientos de medición. Por ejemplo, serían de gran utilidad tanto para la caracterización de un amplificador óptico donde el perfil de ganancia debe ser saturado a lo largo de todo su espectro para obtener medidas fiables, como para realización de medidas de la dispersión por modos de polarización llevadas a cabo normalmente por láseres sintonizables.

2.2 Soluciones desarrolladas

Muchas han sido las soluciones propuestas hasta el momento para generar fuentes de luz láser con salidas multilambda atendiendo a los diversos dispositivos ópticos (multiplexores y demultiplexores, atenuadores, etc), métodos de amplificación óptica (amplificadores ópticos de semiconductor, fibras dopadas con erbio, etc) y métodos de filtrado (redes de difracción de Bragg, filtros Fabry-Pérot, etc) usados para tal fin. A continuación, se estudiarán algunas de ellas, teniendo en cuenta sus ventajas e inconvenientes.

Varios autores proponen el diseño y fabricación de una fuente multilambda a través de la implementación de un láser de fibra dopada con erbio constituido por dos cavidades [1]. Las cavidades están construidas por dos pares de redes de difracción de Bragg (FBG, Fiber Bragg Grating) colocadas a unas distancias determinadas. El diseño propuesto muestra la dependencia de la potencia óptica frente a la elongación aplicada sobre una de las FBG que forma la cavidad. Entre las ventajas de este sistema destaca la estabilidad y simplicidad de la configuración frente a otras propuestas. Por otra parte, la irregularidad del perfil de ganancia del erbio provoca diferentes grados de ganancia en todo el rango espectral utilizado, generando un espectro de salida no homogéneo. Además, este tipo de topologías para la implementación de fuentes de luz multilambda obliga al usuario a la utilización de tantas cavidades como espectros de luz desea utilizar, lo que provoca sistemas mucho más complejos.

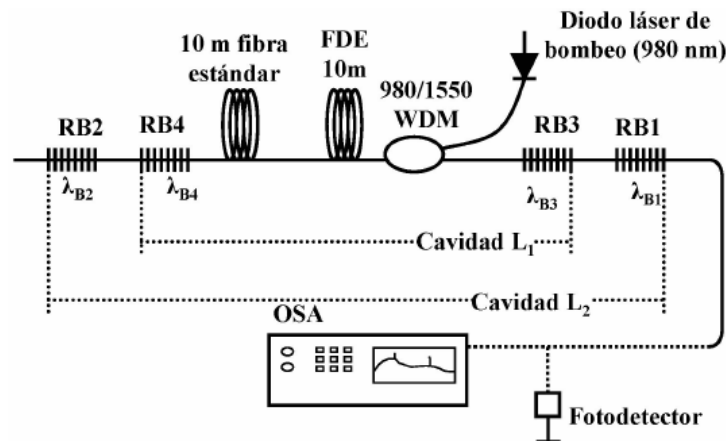


Figura 2.1. Arreglo experimental del láser de fibra con emisión dual seleccionable usando rejillas de Bragg de fibra y fibra dopada con erbio [1]

Otra de las configuraciones adoptada por varios autores se basa en la implementación de una fuente de luz láser de fibra dopado con erbio en configuración en anillo con emisión multilambda [2]. En la Figura 2.2, se observa cómo la selección de las múltiples longitudes de onda de emisión se realiza por medio de cuatro redes FBGs colocadas en serie que actúan como filtros de reflexión. Aprovechando la dependencia de la longitud de onda frente a la temperatura de las FBGs se propone conseguir la capacidad de sintonía de cada una de los espectros discretos de emisión. Entre las ventajas de este tipo de sistemas destaca la posibilidad de ampliación del número de canales con el mero hecho de introducir más FBGs al sistema con el único requerimiento de que no haya solapamiento entre cada uno de los espectros utilizados. Por otra parte, este tipo de sistemas ofrece grandes desventajas como es la limitación en el ancho de banda del erbio que obligado por la distinta ganancia, se obtiene en todo el rango espectral. Además, este sistema obliga a la utilización de una FBG por cada longitud de onda que se quiera implementar, incrementando el coste y la complejidad del sistema. El coste del sistema aumenta

conforme se incrementa el número de FBG utilizadas debido a las pérdidas de inserción y reflectividad asociadas, que provoca el uso de sistemas de amplificación externos para obtener potencias de salida elevadas.

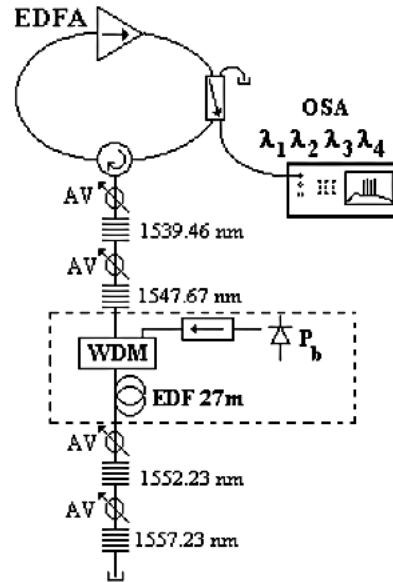


Figura 2.2. EDFRL con filtrado en serie [2]

En la Figura 2.3 se observan diversas aplicaciones que se basan en combinaciones de amplificadores ópticos de semiconductor (SOA, Semiconductor Optical Amplifier) y filtros Fabry-Perot (FPF, Fabry-Perot Filter) para la implementación de fuentes láser multilambda con ecualización de la potencia de salida [3]. Con este sistema se permite implementar hasta cincuenta y dos líneas de emisión distintas a la salida de una misma fibra óptica. Tiene la ventaja de a pesar de ser sistemas complejos tener un reducido tamaño, lo que facilita la implementación en sistemas compactos de medida o comunicaciones. Por otra parte, estos sistemas ofrecen alta estabilidad de la potencia de salida debido al control exhaustivo del FFP.

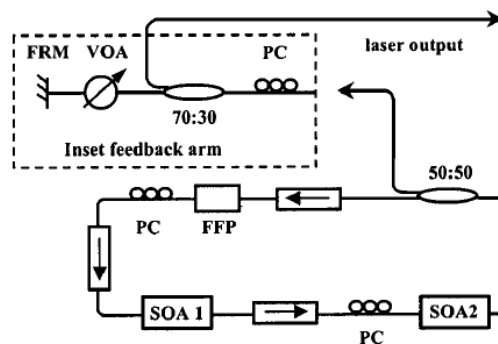


Figura 2.3. Láser multilambda usando FFP [3]

A partir de los párrafos anteriores se puede observar cómo muchas de las soluciones propuestas ofrecen mecanismos similares de emisión de la fuente de luz con la salvedad de que

cada una de ellas utiliza un mecanismo de filtrado espectral o sistemas de amplificación diferentes. Por ejemplo, si nos fijamos en la Figura 2.4 diversos mecanismos utilizan redes de Bragg de largo periodo (LPFG, Long Period Fiber Grating) para el filtrado del espectro [4]. Otras configuraciones como la que se muestra en la Figura 2.5, utilizan como método de amplificación dispositivos ópticos lineales (LOA, Linear Optical Amplifier) [5] en lugar de los no-lineales.

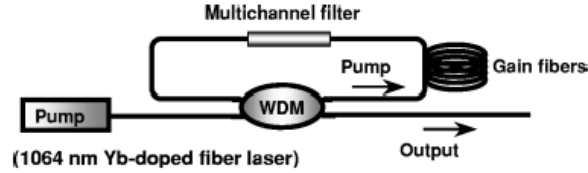


Figura 2.4. Láser en anillo usando LPFGs [4]

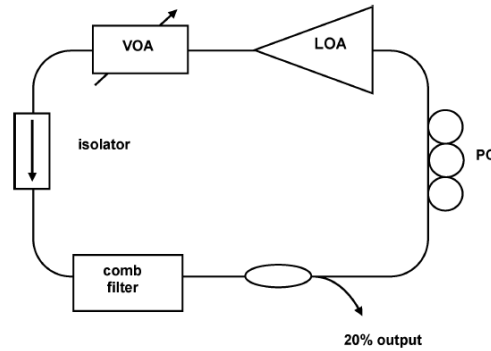


Figura 2.5. Configuración en anillo usando LOAs [5]

Hasta el momento, se ha hablado sobre las distintas tecnologías utilizadas para la implementación de sistemas basados en fuente de luz multilambda. En el presente trabajo, a la hora de implementar en el laboratorio la fuente de luz multilambda, se llevará a cabo mediante la implementación de una tipología basada en el filtrado a través de FBGs.

Como bien se ha comentado en el objetivo de este proyecto, además de una fuente de luz multilambda, se pretende estudiar la viabilidad de implementar una fuente sintonizable para posibles aplicaciones de sensado.

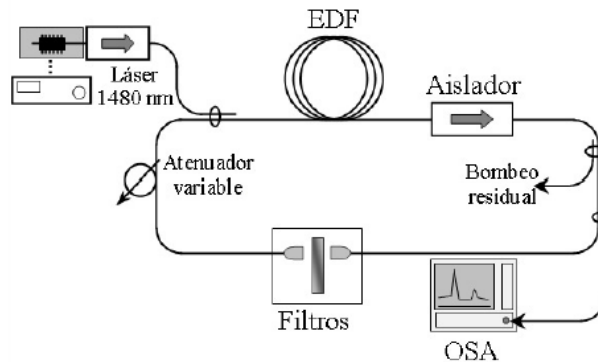


Figura 2.6. Montaje experimental del láser en anillo con EDF [6]

Existen diferentes tipologías que implementan fuentes de luz multilambda con fuentes sintonizables. Una de las propuestas mostradas en la literatura se observa en la Figura 2.6. Esta configuración se basa en la utilización de láseres de fibra dopada con erbio usando filtros de láminas planoparalelas [6]. La sintonización en este tipo de fuentes se basa en la implementación de filtros paso-banda configurables. Una de las características más importantes de este tipo de esquemas es su bajo coste, principalmente asociado a la simplicidad de las láminas planoparalelas. En contrapartida, como se ha comentado anteriormente, el sistema utiliza fibra dopada con erbio que tiene la principal desventaja de tener ganancias diferentes en todo el rango de longitudes de onda de trabajo. Además, el uso láminas planoparalelas hace que el sistema sea impreciso y con escasa estabilidad.

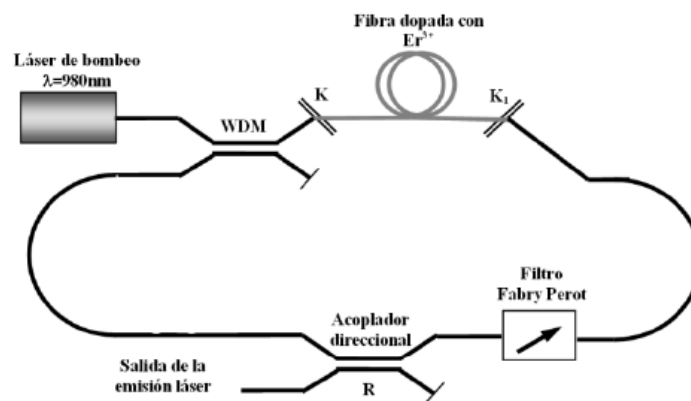


Figura 2.7. Configuración láser sintonizable en anillo [7]

Por último, otra configuración utilizada en este tipo de sistemas se basan en la utilización de un láser de erbio en configuración en anillo con FFP sintonizable [7]. Como se observa en la Figura 2.7, la sintonización en este tipo de sistemas se basa en la modificación de la frecuencia de resonancia del filtro variando la distancia entre las dos fibras que conforman el filtro. La frecuencia de resonancia puede controlarse precisamente a través de sistemas de microposicionamiento controlados electrónicamente mediante software de control, consiguiendo una alta precisión. Al igual que ocurre con el resto de sistemas basado en erbio, el efecto de la variación de ganancia con la longitud de onda afecta a la potencia de salida de la fuente.

En el presente trabajo, el estudio de la capacidad de sintonización en el laboratorio, se llevará a cabo mediante el aprovechamiento de determinadas propiedades de las FBGs permitiendo así obtener una solución económica al no tener que añadir elementos extra al sistema.

2.3. Solución propuesta

En el presente trabajo se propone el diseño, desarrollo y caracterización de una fuente de luz multilambda bajo una topología de anillo. Esta topología se basa en la continua realimentación de la energía que poseen los espectros ópticos seleccionados dentro del bucle.

El sistema está compuesto por una fuente de luz formada por un diodo superluminiscente (SLD, Superluminescent Diode) de ancho espectro que se encarga de suministrar potencia óptica en un rango de longitudes de onda lo suficientemente ancho como para abarcar los espectros a discretizar en la fuente multilambda.

El sistema de discretización de cada uno de los espectros de la fuente de luz se basa en la utilización de redes de difracción de Bragg para realizar un filtrado a cada espectro deseado, dependiendo del parámetro de reflectividad, longitud de onda central de la red de Bragg y del ancho de banda a la altura media (FWHM, Full Width at Half Maximum). Una correcta selección de las longitudes de onda central y del ancho de banda de la FBG, determinará la compatibilidad de los espectros con la estandarización de los canales de los demultiplexores y multiplexores WDM.

Con el fin de equiparar el nivel de potencia óptica de salida de los canales de emisión del sistema, se propone la utilización de multiplexores (MUX) y demultiplexores (DEMUX), junto con atenuadores ópticos variables (VOA, Variable Optical Attenuator) para poder equalizar cada línea de emisión de manera independiente y sin influencia entre ellas.

La configuración anterior genera una gran cantidad de pérdidas debidas principalmente a las pérdidas de inserción de cada uno de los elementos del sistema, la reflectividad de las redes de Bragg y las pérdidas de atenuación de la fibra monomodo entre otras pérdidas atribuibles al sistema. Se procede por tanto a la utilización de SOA que evite la pérdida de potencia de la fuente multilambda.

Son múltiples las ventajas que ofrece una fuente de luz multilambda basada en el filtrado de una fuente de ancho espectro (BLS, Broadband Light Source) a través de FBGs con respecto a otras propuestas. Entre ellas cabe destacar la compatibilidad en la fibra, la selección de un amplio rango de longitudes de onda centrales y anchos de banda y la facilidad de fabricación. Por otra parte, los multiplexores y los demultiplexores son dispositivos ópticos estandarizados, lo que implica que el sistema propuesto estará adaptado a la normativa de canales de telecomunicaciones de la ITU [8, 9]. Además, facilitan la escalabilidad del sistema simplemente reemplazando los usados inicialmente por otros con mayor número de canales. Finalmente, la utilización de una BLS reduce ligeramente el coste inicial de utilizar una fuente multilambda fabricada con un láser de bombeo.

En cuanto a las desventajas que ofrece la configuración elegida, destaca el uso de métodos de amplificación no lineales, como es un amplificador basado en semiconductor en lugar de métodos lineales, dando lugar a que el sistema sea mucho más propenso a fluctuaciones de potencia generadas por la competencia mutua entre cada uno de los espectros [5].

Por otra parte, con el fin de encaminar el presente trabajo hacia trabajos futuros, se decide estudiar la capacidad de sintonización de las FBGs para dotar de una nueva funcionalidad a la fuente de luz multilambda que permita utilizarla como sistema sintonizable en sistemas de sensado que no cumplan con los estándares de comunicaciones para dispositivos WDM-PON. Para estudiar esta capacidad de sintonización, se dispone a utilizar la propiedad que tienen las FBGs de modificar su longitud de onda central con la temperatura. La aplicación de temperatura sobre la FBG se realizará a través de una placa calefactora y un sistema de control que permitan modificar y controlar la temperatura con gran precisión y resolución. Se elaborará un programa informático que introduciendo la longitud de onda central del espectro permita al usuario obtener a la salida de la fuente de luz el valor espectral deseado. Entre las desventajas que tiene esta técnica de sintonización basada en una placa calefactora convencional, destaca el reducido rango de sintonización y resolución obtenido. Propuestas mencionadas anteriormente ofrecen rangos de sintonización y resolución más elevados, como puede observarse en [7].

Capítulo 3

Desarrollo teórico de la fuente de luz multilambda

3.1 Fibra óptica

La fibra óptica es una guía de onda cilíndrica a través de la cual se propaga la luz. Su estructura básica consta de un núcleo, el revestimiento y la cubierta [10]

El núcleo (core), es la parte interna de la fibra fabricado de material dieléctrico transparente, normalmente de sílice dopado con materiales como B_2O_3 , GeO_2 o P_2O_6 para ajustar su índice de refracción, aunque también existen fibras ópticas con el núcleo de plástico (POF, Plastic Optical Fiber).

El revestimiento (cladding), es la capa que envuelve al núcleo. Está fabricado con materiales parecidos a los del núcleo con la salvedad de tener un índice de refracción menor.

La cubierta (coating), es una capa de protección situada sobre el revestimiento fabricada normalmente de plástico.

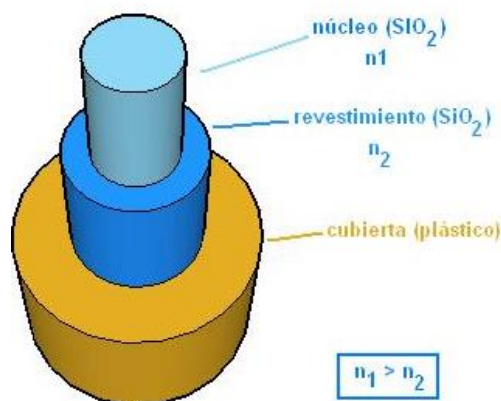


Figura 3.1. Estructura de una fibra óptica [10]

El principio de funcionamiento debido al cual los rayos de luz consiguen penetrar en la fibra quedando confinados en su núcleo para ser guiados hacia el otro extremo de la misma, es conocido como el fenómeno de reflexión total. Para que éste se produzca es necesario que el índice de refracción del revestimiento (n_2) sea menor que el índice de refracción del núcleo (n_1), y además que el ángulo con el que incida la luz en la fibra (θ_1) sea mayor que el valor del ángulo crítico (θ_c) (Eq.3.1).

$$\text{sen } \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (3.1)$$

Existen distintas formas de clasificar las fibras ópticas. Atendiendo al modo de propagación de los rayos en el interior de su núcleo, éstas se pueden clasificar como fibra monomodo si sólo se propaga un modo en el interior de su núcleo o como fibra multimodo si son varios los modos que se pueden propagar de manera simultánea.

Durante su propagación a través de la fibra óptica, el pulso de luz sufrirá determinadas distorsiones que limitarán la distancia y la velocidad de transmisión. Por una parte, la atenuación es la responsable de la pérdida de potencia de la señal óptica al propagarse por la fibra, cuantificándose normalmente en dB/km (Eq.3.2).

$$\alpha = -10 \log \left(\frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \right) \quad (3.2)$$

Por otra parte, la dispersión es el fenómeno que produce el ensanchamiento temporal del pulso de luz original, pudiéndose calcular como se muestra en (Eq.3.3), donde el término de dispersión intermodal es el debido a la diferencia de velocidad de propagación de los modos que se propagan por una fibra, el de dispersión cromática deriva del hecho de que las longitudes de onda que conforman el espectro una fuente de luz no se propagan a la misma velocidad y la dispersión por modo de polarización es debida a las diferentes velocidades a las que viajan los modos de polarización. Cabe destacar que la expresión de la dispersión total mostrada deberá ser particularizada para cada tipo de fibra ya que, por ejemplo en el caso particular de la fibra monomodo el término de dispersión intermodal no aplicaría.

$$\sigma_{\text{Total}}^2 = \sigma_{\text{intermodal}}^2 + \sigma_{\text{cromática}}^2 + \sigma_{\text{PDM}}^2 \quad (3.3)$$

En el presente trabajo, se utilizará la fibra monomodo estándar (SMF, Standar Single Mode Fiber) cuyas características más destacadas son la atenuación de aproximadamente 0.2 dB/km y la dispersión cromática de 16 ps/km.nm en 3ª ventana.

Por último, destacar el conjunto importante de ventajas que ofrece la fibra óptica con respecto a otros soportes utilizados en la transmisión de señales analógicas y digitales. Tiene gran ancho de banda, baja atenuación, inmunidad frente a interferencias electromagnéticas, menor peso

y volumen y compatibilidad con la tecnología digital. Entre las principales desventajas destaca el elevado coste de instalación y la fragilidad de las fibras.

3.2. Fuente óptica de ancho espectro

El término de fuente de ancho espectro hace referencia a una fuente de luz cuyo ancho de banda óptico suele ser de decenas de nanómetros pudiendo llegar hasta las centenas de nanómetros. Este tipo de fuentes ópticas suelen ser fabricadas a partir de diodos emisores de luz (LED, Light-Emitting Diode), diodos superluminiscentes (SLD, Superluminescent Diode), o emisiones espontáneas amplificadas (ASE, Amplified Spontaneous Emissions) basadas en amplificadores de fibra dopada con Erbio (EDFA, Erbium-Doped Fiber Amplifiers). En cuanto a sus aplicaciones, son extremadamente útiles en sistemas WDM [11, 12], caracterización espectral de dispositivos pasivos, interrogación de sensores de fibra óptica [13], tomografías [14, 15] o el análisis espectral de materiales.

La fuente de ancho espectro utilizada durante la realización del presente trabajo, está fabricada a partir de SLDs, los cuales aunque tienen características electro-ópticas cercanas a las del láser carecen de realimentación óptica por reflexión evitando así que aparezca el efecto láser. Ofrecen unas potencias ópticas de salida que van de unos pocos milivatios hasta las decenas de milivatios. Además, favorecen la estabilidad del sistema especialmente en condiciones de temperatura variable.

3.3. Acopladores

Dispositivos ópticos utilizados para la combinación y distribución de señales, la multiplexación y demultiplexación por longitud de onda, la construcción de dispositivos ópticos de mayor complejidad que aporten mayores ventajas y la monitorización de sistemas de comunicaciones. Dependiendo de las aplicaciones en las cuales se utilicen, los acopladores presentan distintas configuraciones:

Acopladores NxM: dispositivos que distribuyen la potencia que entra por uno de los N puertos de entrada entre los M terminales de salida. Un ejemplo de esta configuración sería el acoplador 2x2 mostrado en la Figura 3.2.

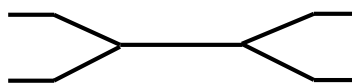


Figura 3.2. Acoplador 2x2

Acopladores en Y: empleados tanto como divisores como combinadores de potencia. Ver Figura 3.3 y Figura 3.4.

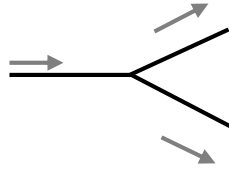


Figura 3.3. Divisor en Y

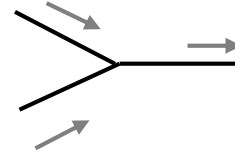


Figura 3.4. Acoplador Combinador en Y

Acopladores en estrella: Muchas configuraciones se obtienen combinando un número concreto de acopladores. Este es el caso de los acopladores en estrella que se obtienen combinando acopladores 2x2.

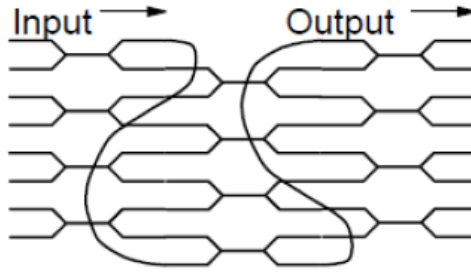


Figura 3.5. Acoplador en estrella 8x8 [16]

El comportamiento de un acoplador queda determinado en su matriz de scattering (Eq.3.4), la cual expresa de forma sencilla la distribución de la señal entre los distintos puertos del dispositivo:

$$S = \begin{pmatrix} \sqrt{1-k} & j\sqrt{k} \\ j\sqrt{k} & \sqrt{1-k} \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

A la hora de caracterizar los acopladores los parámetros a tener en cuenta serán:

El **coeficiente de acoplo**. La potencia que se dirige a cada puerto de salida del acoplador no tiene por qué ser siempre la misma. Será el parámetro **k** conocido como **coeficiente de acoplamiento** el encargado de determinar cuánta se dirigirá. Algunos valores típicos de k son 90:10, 50:50 aunque también existen acopladores con k variable.

$$K_r = \frac{P_r}{\sum P_j}, \text{ donde: } r = \text{Puerto de salida considerado, } j=M \text{ salidas} \quad (3.5)$$

Las **pérdidas de inserción**, pérdidas asociadas a un camino concreto del acoplador:

$$L_{ij} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_i}{P_j} \right), \text{ donde: } i = N \text{ entradas, } j = M \text{ salidas} \quad (3.6)$$

Por último, para entender el funcionamiento de un acoplador 2x2 como el que se ha usado en el desarrollo del sistema propuesto en el presente trabajo nos fijamos en la Figura 3.6.

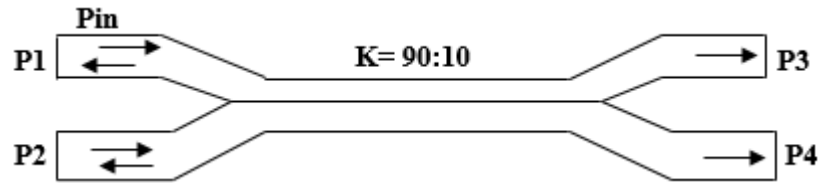


Figura 3.6. Acoplador 2x2 con $k=90:10$

Se introduce una potencia P_{in} a través del puerto uno de entrada (P1), ésta se repartirá entre los puertos de salida: P3 (será la potencia transmitida, el 90% en este caso) y P4 (será la potencia acoplada, el 10%). Resaltar que parte de la potencia, en torno a 50 dB por debajo de la potencia de entrada, será reflejada hacia los puertos de entrada P1 y P2.

3.4. Multiplexores y Demultiplexores ópticos

Los multiplexores (MUX) son dispositivos capaces de juntar diferentes señales ópticas, con diferentes longitudes de onda, procedentes de distintos canales en un punto y transmitirlas a través del mismo soporte físico, en este caso la misma fibra óptica.

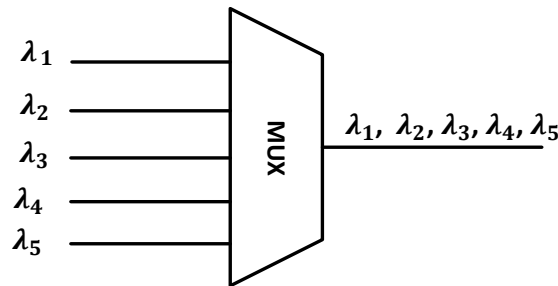


Figura 3.7. Símbolo del multiplexor

Los demultiplexores (DEMUX) son dispositivos capaces de separar en distintos canales diferentes señales ópticas procedentes del mismo soporte físico, en este caso de la misma fibra óptica.

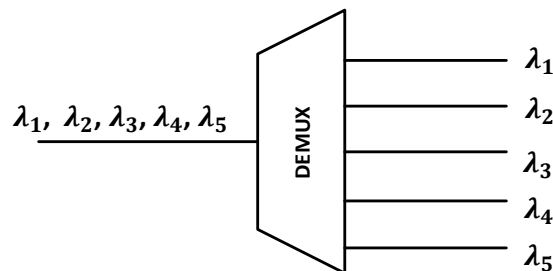


Figura 3.8. Símbolo del demultiplexor

Es conveniente destacar que tanto los multiplexores como los demultiplexores son dispositivos que actualmente tienen un papel relevante en sistemas WDM.

La técnica WDM se basa en aprovechar el gran ancho de banda que poseen las fibras ópticas para transmitir diferentes señales ópticas procedentes de distintos canales sin que exista ninguna interferencia entre ellos a través de ellas, quedando así el ancho de banda inicial de cada fibra dividido entre los distintos canales. El empleo de ésta técnica de multiplexación ofrece distintas ventajas que merecen la pena ser destacadas. Por una parte, el aumento de la capacidad en los sistemas al utilizar de manera eficiente el mismo medio de transmisión y por otra parte la escalabilidad ya que los canales de transmisión pueden ser añadidos o eliminados dependiendo de la demanda existente.

Se distinguen dos tipos de técnicas WDM dependiendo de la separación existente entre canales. Por un lado nos encontramos con la multiplexación por longitud de onda densa (DWDM, Dense Wavelength Division Multiplexing) y por otro con la multiplexación por longitud de onda ligera (CWDM, Coarse Wavelength Division Multiplexing).

DWDM: cuya separación entre canales es de 0.4-0.8nm (50-100GHz), actualmente también puede existir una separación de 12.5 y 25 GHz que da lugar a la conocida coloquialmente como UDWDM (Ultra Wavelength Division Multiplexing). Estos espaciados vienen determinados por ITU-T, en su recomendación G.694.1 [8]. La ventaja con respecto a CWDM es que ofrece un ancho de banda mayor y la desventaja es que se usan dispositivos muy sofisticados lo que implica que sean más costosos.

CWDM: cuya separación entre canales es de 20nm (2500GHz), espaciado determinado por ITU-T, en su recomendación G.694.2 [9]. En este caso las ventajas y desventajas son las opuestas con respecto a DWDM, la ventaja es que los dispositivos son menos costosos y la desventaja que se dispone de un menor ancho de banda.

3.5. Atenuador óptico variable

El atenuador óptico variable es un dispositivo utilizado en sistemas de comunicaciones ópticas que permite reducir la potencia de la señal óptica de forma gradual para obtener así los niveles de potencia deseados. El VOA puede desempeñar un papel importante en escenarios donde se desee simular las pérdidas debidas a la distancia en un enlace de comunicaciones, si se quiere evitar dañar determinados dispositivos con niveles de potencia muy altos o para ecualizar la potencia de distintos canales para que tenga el mismo nivel de potencia.



Figura 3.9. Símbolo del atenuador óptico variable

Su principio de funcionamiento se basa en la torsión del segmento de fibra que atraviesa internamente el atenuador. En el caso de los VOAs usados en el presente trabajo, la torsión de la fibra se realiza de manera manual girando un tornillo.

3.6. Circulador óptico

Un circulador es un tipo de dispositivo óptico pasivo cuya principal función es encaminar toda la luz que entra por uno de sus puertos hacia el siguiente puerto. Los circuladores suelen tener comúnmente 3 ó 4 puertos. En cuanto a las pérdidas de inserción teóricas que presentan suelen estar en el rango de 0.5 a 1.5 dB.

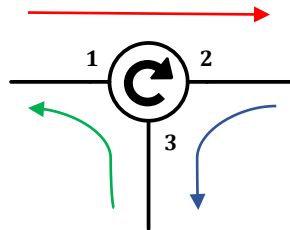


Figura 3.10. Símbolo del circulador óptico

Prestando atención la Fig.3.10, se puede entender cómo se encaminan las señales ópticas en un circulador. La señal que entra por 1 sale por 2 (flecha roja), la que entra por 2 sale por 3 (flecha azul) y por último, la que entra por 3 sale por 1 (flecha verde). Notar que las señales sólo pueden introducirse por la entrada correcta, es decir, que si el objetivo es encaminar toda la luz hacia el puerto 3 deberemos hacerlo desde la entrada que corresponde al puerto 2 y no desde la que corresponde al puerto 1.

En la Fig.3.11, se muestra la representación interna de un circulador de tres puertos. Como se puede observar, los componentes básicos que lo forman son: el rotador de Faraday, la lámina birrefringente y la lámina $\lambda/2$ [17].

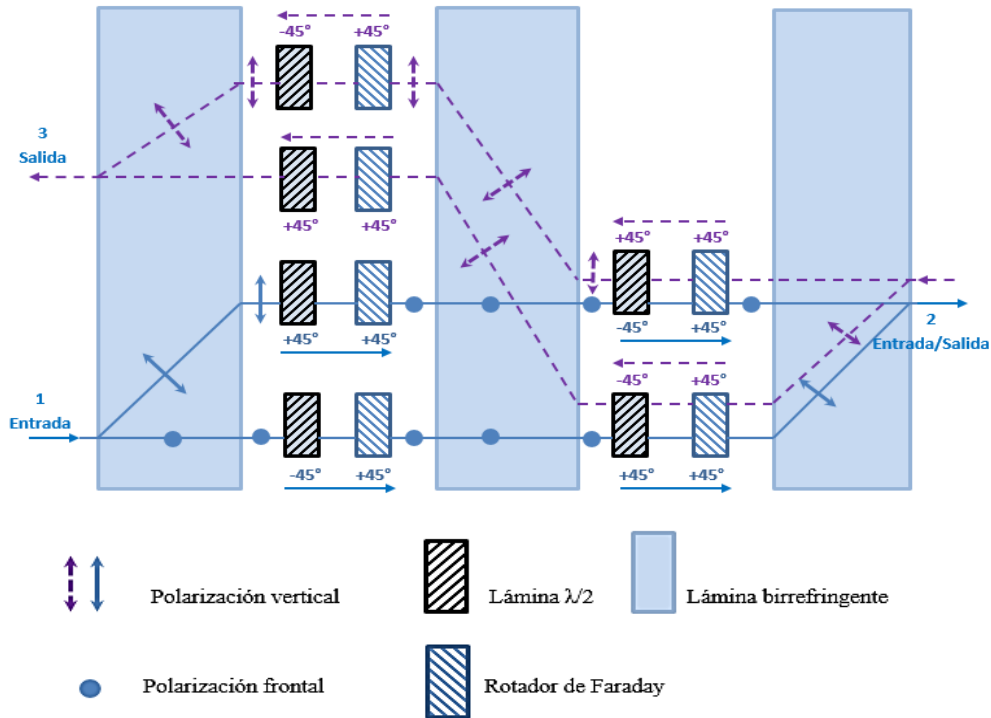


Figura 3.11. Configuración interna de un circulador óptico

Rotador de Faraday: elemento cuya función es rotar la polarización de la luz que incide sobre él. Para ello, aprovecha el cambio de rotación que experimenta la polarización de la luz cuando atraviesa determinados materiales ópticos que contienen átomos o iones magnéticos.

Lámina birrefringente: cristal (ejemplo más común la calcita) que posee un índice de refracción diferente para cada estado de polarización afectando cada uno de distinta forma a la señal incidente. El efecto que sufre la señal incidente será distinto dependiendo de si está polarizada o no. Si no está polarizada, el cristal debidamente tallado y con alguna de sus direcciones específicas coincidente con la de la señal incidente, procederá a separarla en sus dos componentes de polarización a la salida. Sin embargo, si la señal está polarizada y la dirección de propagación coincide con el eje principal del cristal a la salida la señal habrá rotado un cierto ángulo en función de la longitud del cristal.

Lámina $\lambda/2$: es un caso especial de lámina birrefringente donde la rotación que experimenta la señal es de 45° . Notar que si la propagación fuese en sentido contrario el ángulo sería -45° .

Para entender cuál es el funcionamiento de un circulador nos fijamos en la Fig.3.11, donde se muestra el caso particular del encaminamiento de la señal desde el puerto 1 al puerto 2.

La señal sin polarizar se introduce desde el puerto 1 encontrándose con el primer elemento, la lámina birrefringente que ofrece a su salida la señal dividida en las 2 componentes de

polarización (vertical y horizontal). Cada componente por separado se encuentra a continuación con una lámina $\lambda/2$ seguida de un rotador de Faraday. En el caso de la componente vertical se rota $+45^\circ$ dos veces obteniéndose a la salida una polarización frontal. En el caso de la componente frontal se rota primero -45° y luego $+45^\circ$ lo que lógicamente ofrece a la salida una polarización frontal. La señal atraviesa de igual manera el resto de elementos sufriendo los efectos correspondientes hasta llegar a la última lámina birrefringente que junta ambas componentes, obteniendo así en el puerto 2 la señal que se introdujo en el puerto 1.

Notar que el esquema representa el diseño de un circulador que encamina las señales del puerto 1 al 2 y del puerto 2 al 3 pero no del puerto 3 al 1. Resaltar que en muchas ocasiones el encaminamiento de señales del puerto 3 al 1 es opcional.

3.7. Aislador óptico

Dispositivo óptico que sólo trabaja en un sentido, lo que implica que la señal óptica sólo podrá atravesarlo en una dirección. Esta propiedad lo convierte en un componente de gran importancia en sistemas donde se quiere evitar que las reflexiones alcancen y dañen ciertos dispositivos como pueden ser los láseres.

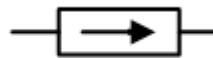


Figura 3.12. Símbolo del aislador óptico

Para entender el comportamiento del aislador óptico, igual que en el caso del circulador, se va a observar su configuración interna permitiendo entender la evolución de la luz según avanza a través de la misma [17].

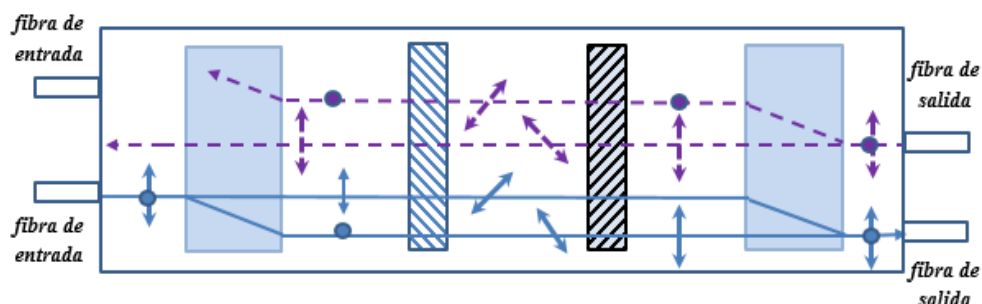


Figura 3.13. Configuración interna de un aislador óptico

La luz de entrada se descompone en sus dos componentes de polarización a su paso a través de la primera lámina birrefringente, siguiendo cada una trayectorias diferentes y consecuentemente teniendo comportamientos diferentes. A la salida, ambos haces se unen de nuevo y se transmiten por la fibra de salida de manera normal.

En el camino inverso (de fibra de salida a fibra de entrada, representado en morado discontinuo en la Figura 3.13), sin embargo, la radiación que debería pasar a la fibra de entrada es bloqueada por el material birrefringente.

3.8. Amplificador óptico semiconductor

Los amplificadores ópticos semiconductores son dispositivos que generan a su salida una réplica de la señal óptica de entrada pero con mayor nivel de potencia. La principal característica de estos dispositivos es que amplifican la señal sin necesidad de pasarla al dominio eléctrico. Además de su papel como amplificadores pueden emplearse en procesos de enrutamiento o de conversión de longitudes de onda. Aunque existen varios tipos de amplificadores ópticos como los amplificadores de fibra dopada o los amplificadores de semiconductor, será en estos últimos en los que se centre la explicación teórica debido a que han sido los utilizados en el desarrollo del presente trabajo.

Para entender el principio de funcionamiento de un SOA es necesario definir previamente algunos conceptos básicos como son [10]: la inversión de población y la emisión estimulada.

Inversión de población: consiste en tener más átomos en estado excitado que en estado fundamental. Se consigue siempre a través de un proceso de excitación conocido como bombeo y permitirá que tenga lugar la emisión estimulada.

Emisión estimulada: se produce cuando un electrón, por acción de un fotón de igual energía, pasa del estado excitado al estado fundamental, desprendiendo energía en forma de otro fotón coherente con el primero, ver Fig.3.14.

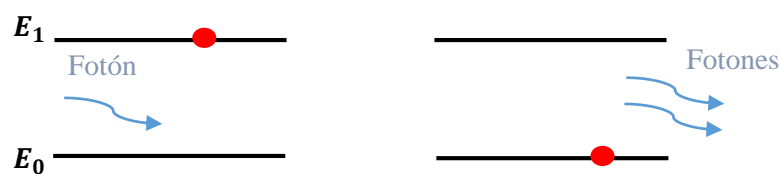


Figura 3.14. Proceso de emisión estimulada

Una vez explicados los conceptos básicos, se puede explicar el principio de funcionamiento de los SOAs, el cual se basa en el proceso de emisión estimulada al igual que en un láser, de ahí que su estructura, sea similar a la de un láser convencional con la salvedad de que no posee realimentación para evitar que el dispositivo oscile, de esta forma podrá aumentar el nivel de potencia de la señal pero no generar una señal óptica coherente.

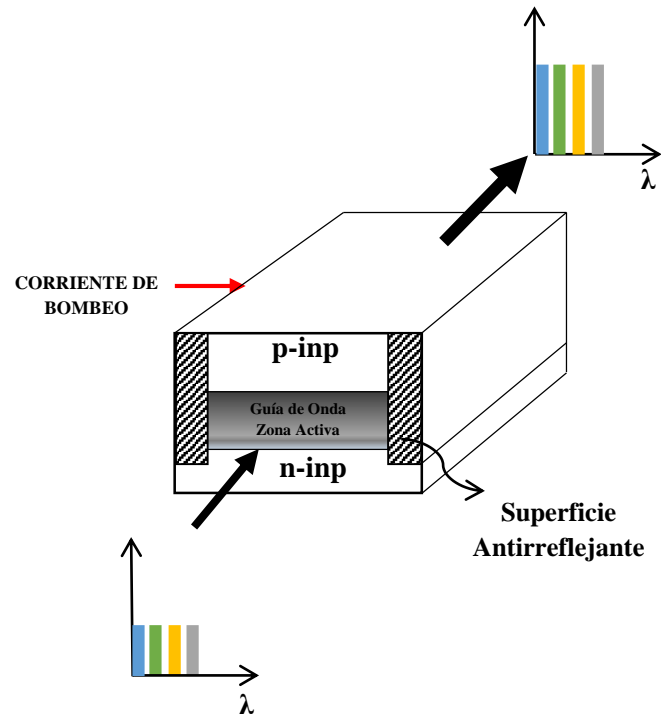
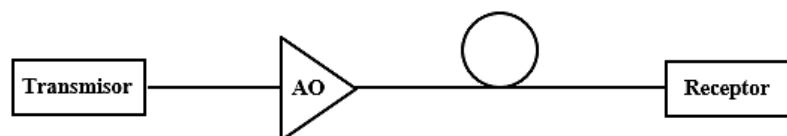


Figura 3.15. Estructura de un Amplificador óptico semiconductor

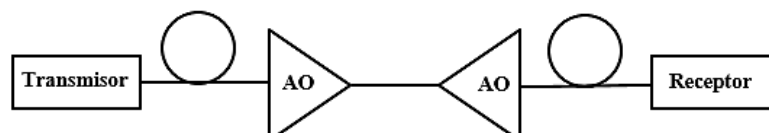
La estructura de un SOA mostrada en la Figura 3.15, consiste en un guía de onda conocida como zona activa, habitualmente construida con aleaciones de elementos semiconductores como el fósforo, el indio, el galio y el arsénico, donde se confina la luz y es amplificada a su paso a través de ella. Esta zona activa está intercalada entre unas regiones de tipo p y tipo n que dan lugar a una heterounión p-n. Las caras de entrada y salida integran unas superficies antirreflectantes que tienen como principal función evitar la realimentación óptica anteriormente mencionada. La corriente eléctrica (corriente de bombeo) permite disponer de una gran concentración de portadores en la zona activa dando lugar así a la inversión de población que permite que tenga lugar la emisión estimulada que permitirá conseguir la ganancia óptica esperada [18].

Por último, destacar que según la posición que ocupe el amplificador en el enlace de comunicaciones ópticas podrá operar como:

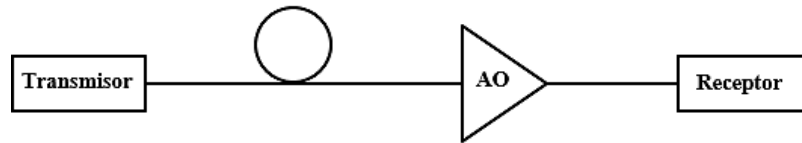
Amplificador de potencia



Amplificador de línea



Preamplificador



3.9. Redes de difracción de Bragg

Las redes de difracción de Bragg son estructuras obtenidas como resultado de variar de forma periódica el índice de refracción efectivo del núcleo de la fibra óptica, empleando distintas técnicas cuyo principio básico consiste siempre en exponer la fibra de manera parcial a un patrón establecido de luz ultravioleta. El parámetro que caracteriza la FBG es conocido como longitud de onda de Bragg o longitud de reflexión máxima (Eq.3.7), la cual es proporcional al índice de refracción efectivo (n_{eff}) y al periodo de la red (Λ).

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (3.7)$$

Las FBGs actúan como filtros paso-banda en reflexión, ya que su principal función es reflejar la luz que se propaga en la fibra de una determinada longitud de onda. Observando la Fig.3.16, se entenderá mejor su funcionamiento.

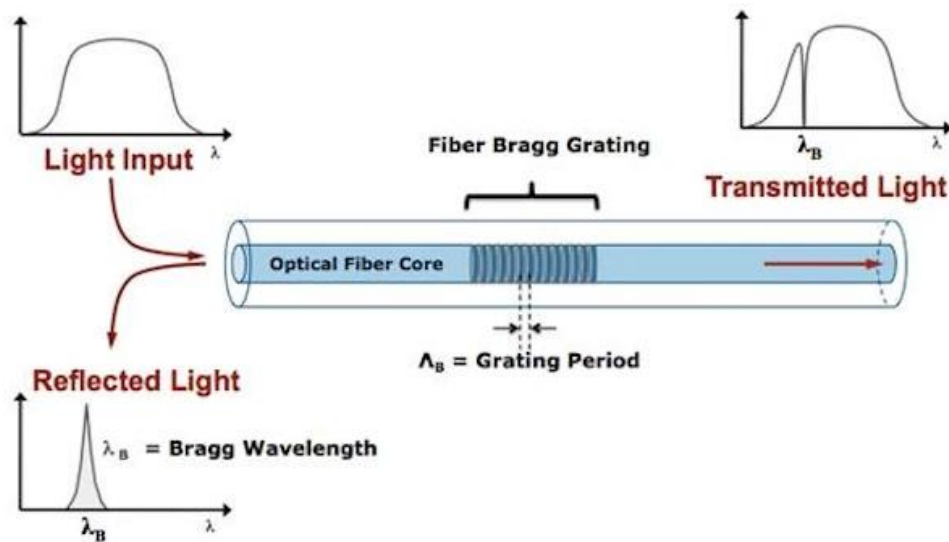


Figura 3.16. Esquema de funcionamiento de una red de Bragg [19]

Un haz de luz (Light Input) con un determinado ancho espectral incide sobre la fibra óptica y se propaga a través de ésta de manera normal hasta que alcanza la FBG. Es en ese momento, cuando parte de la luz que intenta atravesarla es reflejada (Reflected Light). Concretamente, se refleja una banda de frecuencias centrada en la longitud de onda de Bragg λ_B . Mientras, el resto

de componentes espectrales atraviesan la red de Bragg sin sufrir ninguna modificación (Transmitted Light).

Las características de la perturbación periódica del índice de refracción que forman la FBG no tienen que ser necesariamente constantes a lo largo de toda su longitud. Variando adecuadamente la amplitud y el periodo de la perturbación es posible modificar la respuesta espectral de la estructura, tanto en módulo como en fase. A continuación, se describen los tipos de FBGs más comunes en función de las características de la perturbación del índice:

FBGs uniformes, aquellas donde tanto la modulación del índice de refracción (n_{eff}) como el periodo espacial (Λ) permanecen constantes, ver Fig 3.17.

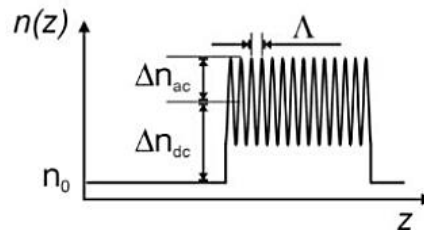


Figura 3.17. Red de Bragg Uniforme [20]

FBGs apodizadas, aquellas donde se reduce el valor de la amplitud de modulación del índice de refracción (n_{eff}) hasta hacerlo igual a cero en ambos extremos de la FBG.

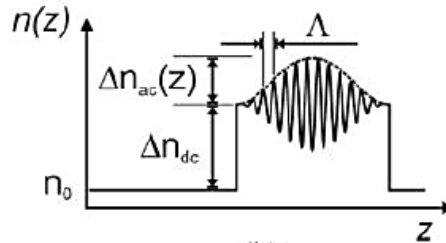


Figura 3.18. Red de Bragg Apodizada [20]

FBGs chirpeadas, aquellas en las que el periodo de variación del índice de refracción cambia linealmente con la distancia.

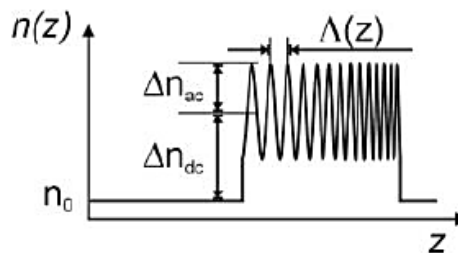


Figura 3.19. Red de Bragg con periodo variable (chirped) [20]

En cuanto a su fabricación, tres son las principales técnicas de inscripción de redes de Bragg en fibra óptica [21]: la técnica interferométrica, la técnica punto por punto y, por último, la técnica de máscara de fase.

La técnica interferométrica, es una técnica de fabricación en la cual la luz ultravioleta de entrada se divide en dos haces que posteriormente se recombinan para generar un diagrama de interferencia que irradia lateralmente la fibra e induce a una variación del índice de refracción en el núcleo de la misma. El ángulo entre los haces permitirá controlar el período del patrón de interferencia y por lo tanto, la longitud de onda de Bragg λ_B .

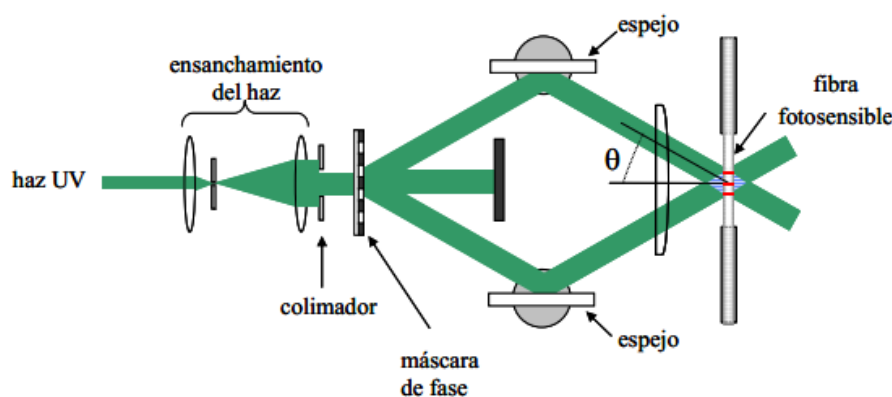


Figura 3.20. Posible esquema de la técnica interferométrica para la grabación de redes de Bragg chirpeadas sobre fibra óptica.[22]

La técnica punto por punto, consiste en enfocar lateralmente un único pulso de radiación ultravioleta dentro del núcleo de la fibra óptica para modificar localmente el índice de refracción. A continuación, la fibra es trasladada en la dirección de su eje, una distancia correspondiente al período de la red y nuevamente irradiada. Repitiendo este proceso se logra formar la estructura de la FBG en el núcleo de la fibra.

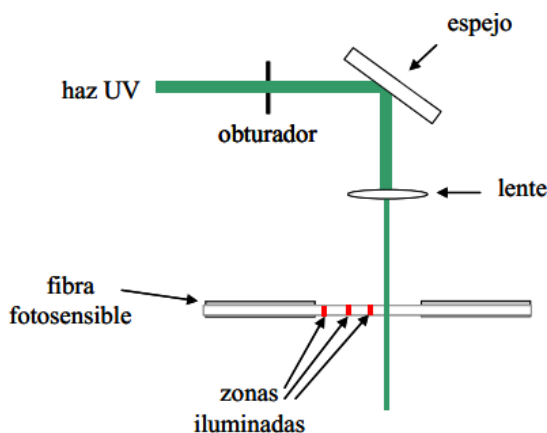


Figura 3.21. Posible esquema de la técnica punto por punto para la grabación de redes de Bragg sobre fibra óptica [22]

La técnica de la máscara de fase, es aquella que emplea un elemento óptico difractivo para modular espacialmente el haz ultravioleta de escritura. Al irradiar dicho elemento con un único haz UV (típicamente en la región espectral $\sim 240\text{-}260\text{ nm}$ donde el proceso de fotosensibilización en fibras ópticas es más eficiente), la luz difractada por los dos primeros órdenes forma al interferir, un patrón de intensidad periódico y de alto contraste que fotoimprime la variación de índice de refracción del núcleo de la fibra óptica.

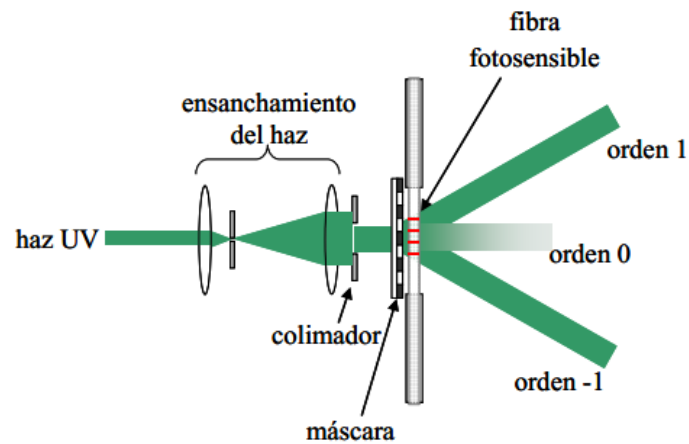


Figura 3.22. Posible esquema de la técnica de máscara de fase para la grabación de redes de Bragg sobre fibra óptica [22]

Debido a sus propiedades únicas de filtrado así como su versatilidad como dispositivos ópticos integrados, las redes de difracción de Bragg en fibra se han convertido en componentes fundamentales en los actuales sistemas de comunicaciones ópticas. Entre sus aplicaciones destacan los sensores ópticos [23, 24], los láseres de fibra [25, 26], los filtros ópticos [27, 28], amplificadores de fibra [29] o el enrutamiento [30].

Capítulo 4

Desarrollo experimental de la fuente de luz multilambda

4.1 Descripción del montaje experimental

El presente Trabajo Final de Grado se basa en el desarrollo experimental de una fuente de luz multilambda para suministrar potencia óptica a distintas longitudes de onda en redes de comunicaciones y sensores basadas en técnicas de multiplexación por división en longitud de onda. Estas técnicas de sensado en redes de comunicaciones WDM, se han venido desarrollando en el laboratorio de investigación del Grupo de Displays y Aplicaciones Fotónicas (GDAF) del departamento de Tecnología Electrónica de la Universidad Carlos III de Madrid (Leganés).

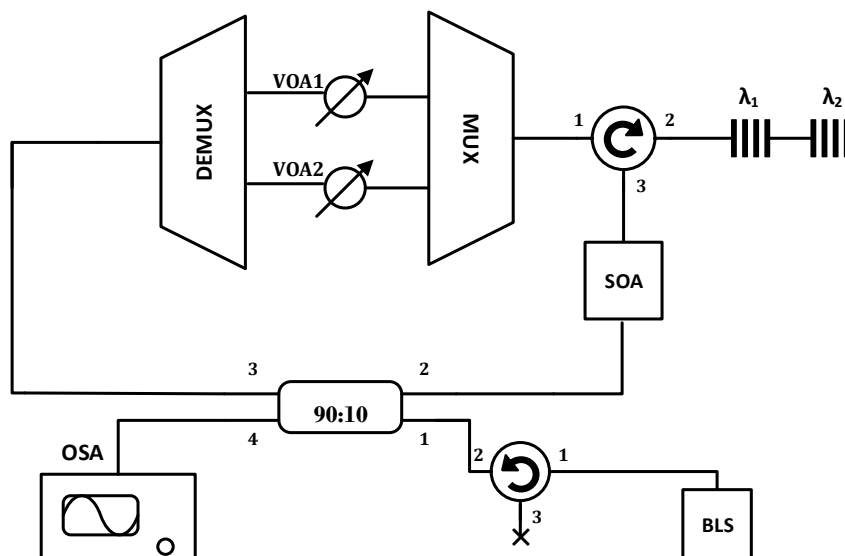


Figura 4.1. Montaje experimental de la fuente de luz multilambda.

El montaje representa una fuente de luz en configuración en anillo que permite al usuario obtener una salida multilambda para su utilización en sistemas de sensado o comunicaciones ópticas. El sistema se basa en la utilización de un acoplador óptico que permite introducir el espectro de una fuente de ancho espectro dentro de la configuración en anillo. Un conjunto de demultiplexores y multiplexores permite ecualizar la potencia óptica de cada uno de los canales que componen la fuente de luz multilambda. Esta ecualización se lleva a cabo por medio de un atenuador óptico variable por cada canal óptico implementado, añadiendo o reduciendo la potencia óptica asignada a cada canal de forma independiente. Para poder seleccionar las longitudes de onda que se utilizarán en la fuente de luz multilambda se hace uso de redes de Bragg que actúan como reflectores de potencia a las longitudes de onda de operación. Las señales reflejadas por las redes de Bragg se reintroducen en el anillo mediante un circulador óptico que asegura el funcionamiento unidireccional del anillo. Cada uno de los elementos del anillo produce pérdidas en la potencia de la fuente de luz de ancho espectro, traduciéndose en pérdidas en la potencia final en las longitudes de onda de operación. Para evitar estas pérdidas, un amplificador óptico semiconductor es utilizado a la salida del circulador con el objetivo de potenciar las longitudes de onda elegidas. Por último, parte de la potencia de salida del amplificador se reintroduce en el anillo por medio del acoplador y parte de ella se saca del circuito para ofrecerle al usuario el espectro de salida de la fuente diseñada.

4.2. Caracterización de equipos y dispositivos ópticos

4.2.1. Fuente de luz de Ancho Espectro

La fuente de luz de ancho espectro utilizada durante la realización de las medidas experimentales fue el modelo Broadband Light Source Multi 9SDL-Source de la marca Agilent. Para poder obtener el espectro de emisión experimental de la fuente de luz mostrado en la Fig.4.2, se ha utilizado un analizador de espectros óptico (OSA, Optical Spectrum Analyzer).

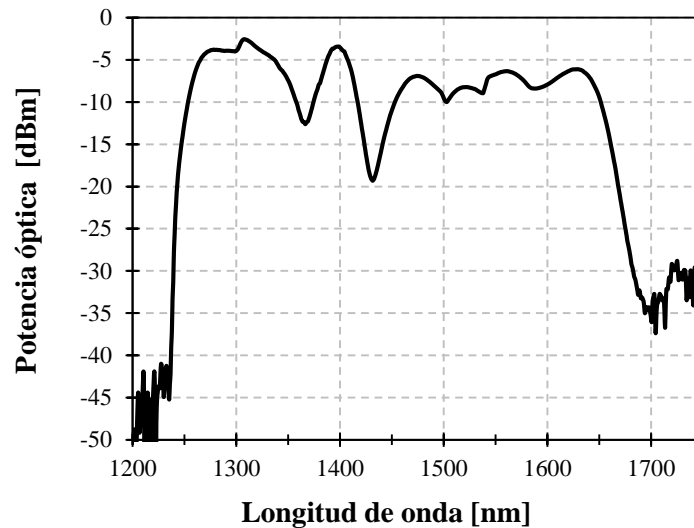


Figura 4.2. Espectro de emisión de la fuente de ancho espectro utilizada en el experimento. Resolución 0.05 nm

En la Fig.4.2 se observa cómo el rango de emisión de la fuente de luz abarca desde los 1250 a 1650 nm. El nivel máximo de potencia de la fuente de luz se sitúa en -2.6 dBm a la longitud de onda de 1308 nm. El nivel de ruido de la fuente está fijado en -45 dBm. El presente Trabajo Final de Grado se basa en el diseño de una fuente de luz multilambda utilizando los canales ópticos existentes en la banda C de comunicaciones óptica [1500–1565 nm]. En esta banda de comunicaciones, la fuente de luz de ancho espectro utilizada tiene un comportamiento plano dándose potencias máximas y mínimas de -7 a -9.1 dBm, respectivamente. Este comportamiento de la fuente ayuda a obtener una fuente multilambda con niveles de potencia equilibrados en toda la banda C de comunicaciones.

4.2.2. Demultiplexor por longitud de onda ligera

Conseguido un espectro plano en la banda C de comunicaciones a través de una buena elección de la fuente de ancho espectro, es necesario dividir dicha banda en regiones más ajustadas al ancho de banda de cada una de las longitudes de onda que compondrán la fuente de luz multilambda. Además de reducir el espectro para cada longitud de onda, la utilización de un demultiplexor CWDM ofrece al usuario la posibilidad de ecualizar la potencia de cada una de las longitudes de onda del sistema de forma independiente. Durante el proceso de realimentación que se produce en el sistema, cada uno de los dispositivos puede atenuar o potenciar cada longitud de onda de forma aleatoria, de esta forma, el usuario final del dispositivo puede graduar el nivel de potencia de cada longitud de onda por separado y sin alterar el resto de canales debido al bajo nivel de crosstalk existente en este tipo de dispositivos.



Figura 4.3. Demultiplexor

En el desarrollo experimental del presente trabajo se ha utilizado un demultiplexor CWDM modelo CWDM-20-4-1510-09-1-FC/APC-D del fabricante Accelink, como se muestra en la Fig.4.3. Este dispositivo dispone de una entrada y cuatro salidas ópticas con fibra monomodo de sílice y conectores FC/APC que permite separar el rango de longitudes de onda comprendido entre 1500 y 1580nm en cuatro canales con un ancho de banda en longitud de onda de 20 nm, ver Fig.4.4.

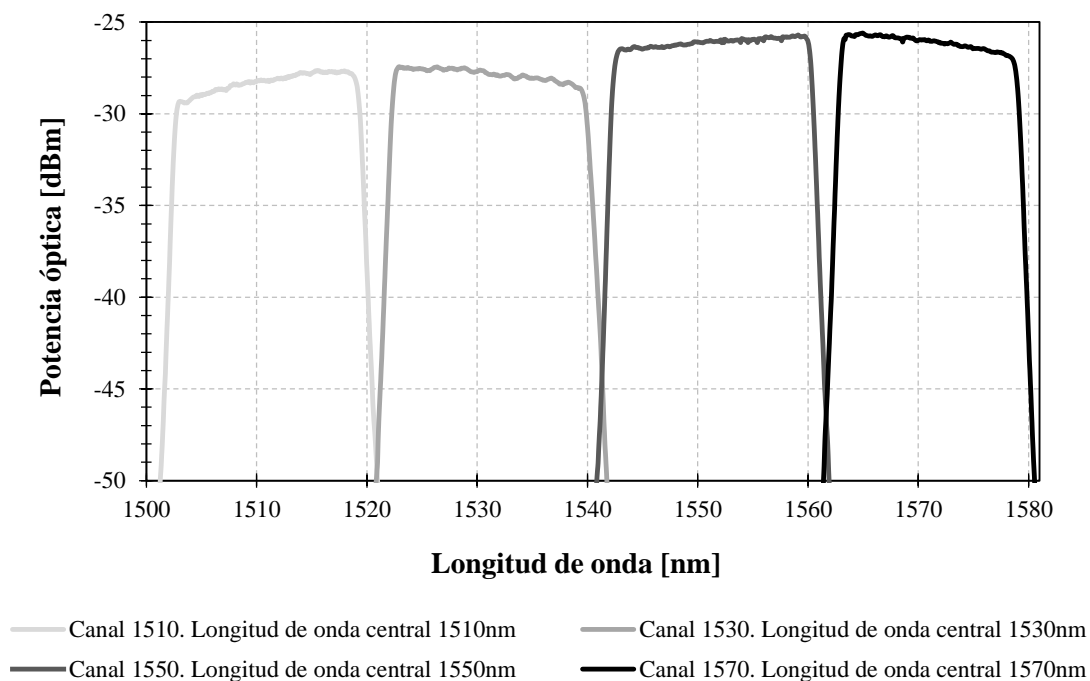


Figura 4.4. Espectro de los cuatro canales de demultiplexación.

A la hora de determinar las pérdidas de inserción de cada uno de los canales del CWDM utilizado en el desarrollo experimental, se ha realizado una caracterización exhaustiva del

dispositivo con el fin de determinar la relación de potencia existente entre cada uno de los canales finales elegidos. La Tabla 4.1 muestra las pérdidas de inserción asociadas a cada longitud de onda central de los canales del demultiplexor CWDM. Además, se muestra el ancho de banda en longitud de onda de cada uno de estos cuatro canales.

| Longitud de onda central [nm] | 1510 | 1530 | 1550 | 1570 |
|--|------|------|------|------|
| Anchura espectral de cada filtro [nm] | 20 | 20 | 20 | 20 |
| Pérdidas de Inserción [dB] | 1.94 | 2.11 | 2.13 | 1.97 |

Tabla 4.1. Características principales del demultiplexor CWDM.

De entre los cuatro canales de demultiplexación que nos ofrece el dispositivo, se va a proceder a seleccionar los canales de 1530 y 1550nm. El motivo principal de esta elección, no es puramente teórico, la razón de la elección se debe a que en el momento del diseño de este sistema, el laboratorio de investigación disponía exclusivamente redes de Bragg en las longitudes de onda que abarcan estos canales de demultiplexado. Salvando esta limitación, el sistema puede abarcar hasta un máximo de cuatro longitudes de onda con la posibilidad de una ecualización individual de forma independiente. Además, la limitación de utilizar cuatro longitudes de onda independientes se puede solventar utilizando demultiplexores con más canales. Estos demultiplexores/multiplexores reciben el nombre de demultiplexores por longitud de onda densa (DWDM). La principal característica de estos dispositivos es la disposición a favor del usuario de un elevado número de canales de demultiplexación, reduciendo el ancho de banda en longitud de onda entre cada uno de ellos. Con estos dispositivos se podrá llegar a obtener una fuente de luz con decenas de longitudes de onda discretas.

4.2.3. Atenuador óptico variable

Como bien se ha comentado en el apartado anterior, para poder ecualizar correctamente la potencia que recibe cada uno de los canales de la fuente de luz multilambda, se ha introducido un elemento que permite modificar la potencia que sale de cada uno de los canales del demultiplexor. Este elemento es un atenuador óptico variable. Este dispositivo está formado por una entrada y una salida óptica monomodo de sílice con conectores FC/APC, que por medio de un tornillo permite atenuar la potencia que circula por su interior, ver Fig.4.5.

**Figura 4.5.** Atenuador óptico variable

En nuestro caso, se han utilizado dos atenuadores ópticos variables modelo VOA50-APC-SM Variable Attenuator de la marca Thorlabs para poder ecualizar cada longitud de onda de forma independiente. Este tipo de atenuador está diseñado para poder trabajar en la segunda y tercera ventana de comunicaciones y no tener muchas pérdidas de inserción entre cada una de ellas.

Para poder controlar de forma precisa la variación de potencia que se le aplica a cada uno de los canales del demultiplexor, se han caracterizado los dispositivos por medio de un láser sintonizable a la longitud de onda central del canal donde van a estar ubicados. En la Fig.4.6 se observa la curva de calibración del atenuador óptico utilizado para el canal cuya longitud de onda central es de 1530nm. La curva de calibración representa la variación en número de vueltas del atenuador y la atenuación aplicada sobre la fibra óptica. En esta curva de calibración se observa una variación de la potencia óptica de aproximadamente 61 dB en tan solo cuatro giros completos del atenuador. Realizando una correcta medición, las pérdidas de inserción del dispositivo son de ~1 dB.

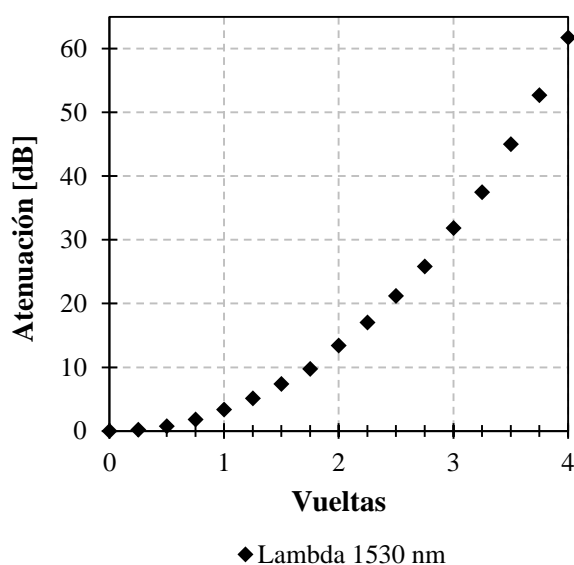


Figura 4.6. Atenuación aplicada frente al número de vueltas del atenuador óptico variable situado en el canal de longitud de onda de 1530 nm.

Al igual que ocurre con el VOA asignado a la longitud de onda de 1530nm, un segundo atenuador óptico se ha situado en el canal óptico cuya longitud de onda central es de 1550nm. Las pérdidas de inserción asociadas a este atenuador se han medido y como resultado es un valor de ~1.3 dB.

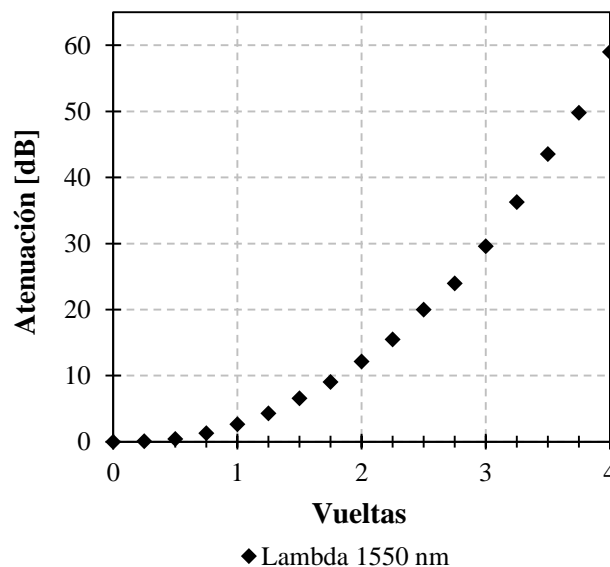


Figura 4.7. Atenuación aplicada frente al número de vueltas del atenuador óptico variable situado en el canal de longitud de onda de 1550 nm.

Finalmente, en la Fig.4.7 se observa la variación de la potencia óptica a la salida del atenuador en función del número de vueltas del atenuador. Para un valor de cuatro vueltas, el atenuador es capaz de atenuar la señal un valor de 60 dB. Uno de los aspectos más destacados a tener en cuenta en este estudio, es la pérdida de inserción introducida por cada uno de los atenuadores. Grandes variaciones de pérdidas de inserción pueden provocar desequilibrios de potencia entre cada una de las longitudes de onda de nuestra fuente multilambda, provocando en un futuro reajustes a través de los VOAs. Este estudio deja claro que desequilibrios muy pequeños se originarán en el sistema debido a los atenuadores y a la igualdad de pérdidas de inserción entre ambos canales.

4.2.4. Multiplexor por longitud de onda ligera

Ecualizadas las dos señales de forma independiente, es necesario unificar todos los canales demultiplexados para poder conducirlos en una única fibra. Para realizar esta operación, se debe de utilizar un multiplexor que trabaje en la misma banda de comunicaciones y con los mismos anchos de banda de longitud de onda por canal que el demultiplexor utilizado para dividir la señal

procedente de la fuente de ancho espectro. Al igual que sucede con el caso del demultiplexor, se trabaja con un multiplexor de fibra óptica monomodo de sílice con conectores FC/APC modelo CWDM-20-4-1510-09-1-FC/APC-M/D con número de serie del fabricante Accelink. En la Fig.4.8 se muestra el espectro de salida del multiplexor. Para representar este espectro se ha introducido la fuente de ancho espectro por cada uno de los canales y se ha analizado y procesado el espectro resultante a la salida del multiplexor. Combinando los cuatro espectros correspondientes a los cuatro canales, se obtiene la curva de calibración del dispositivo.

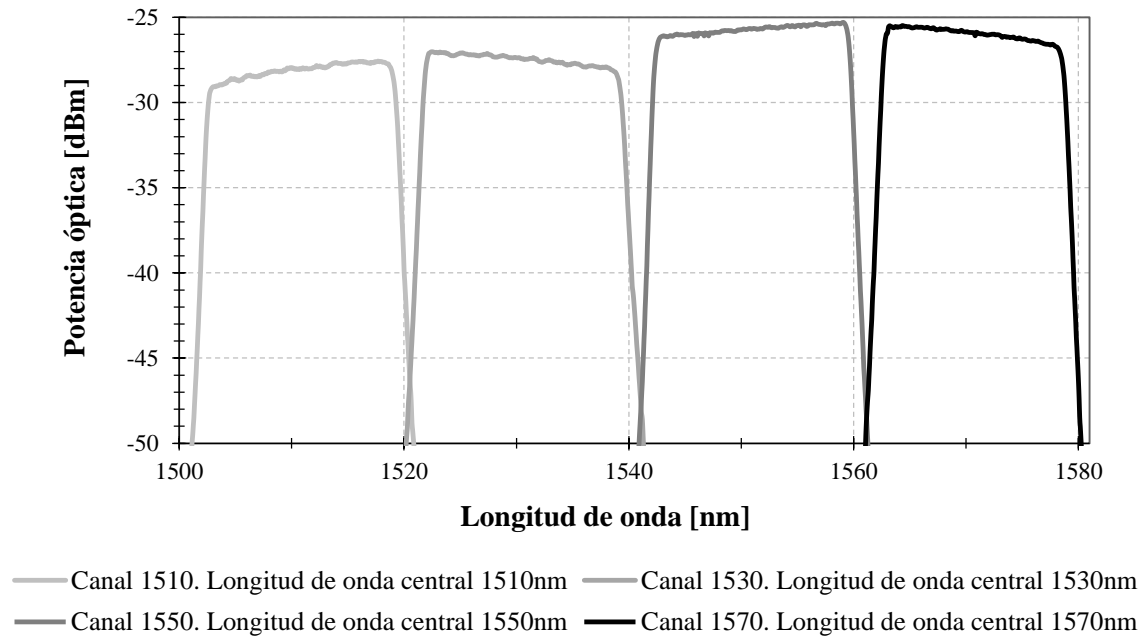


Figura 4.8. Espectro característico del multiplexor CWDM

Al igual que sucede en el caso del demultiplexor, en la Tabla 4.2 se muestran los cuatro canales de multiplexación junto con la longitud de onda central asociada a cada canal. Se observa claramente cómo las pérdidas de inserción de los canales de multiplexación son menores a la de los canales del demultiplexor.

| Longitud de onda central [nm] | 1510 | 1530 | 1550 | 1570 |
|---------------------------------------|------|------|------|------|
| Anchura espectral de cada filtro [nm] | 20 | 20 | 20 | 20 |
| Pérdidas de Inserción [dB] | 0.97 | 0.56 | 0.9 | 1.13 |

Tabla 4.2. Características principales del multiplexor CWDM.

4.2.5. Redes de difracción de Bragg

Filtrada la señal óptica en el rango espectral deseado, el siguiente paso ha sido seleccionar las longitudes de onda de operación de la fuente de luz multilambda mediante el uso de redes de difracción de Bragg, ver Fig.4.9. Como ya se ha explicado anteriormente, estos dispositivos reflejan la potencia óptica correspondiente a su longitud de onda central. Por tanto, las longitudes de operación de la fuente de luz multilambda coincidirán con las longitudes centrales de cada una de las FBGs utilizadas. Cuantas más FBGs se utilicen mayor número de líneas de emisión tendrá la fuente de luz.

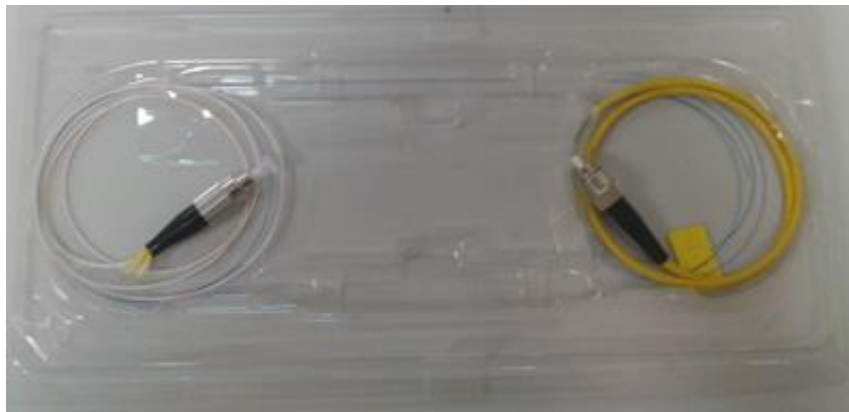
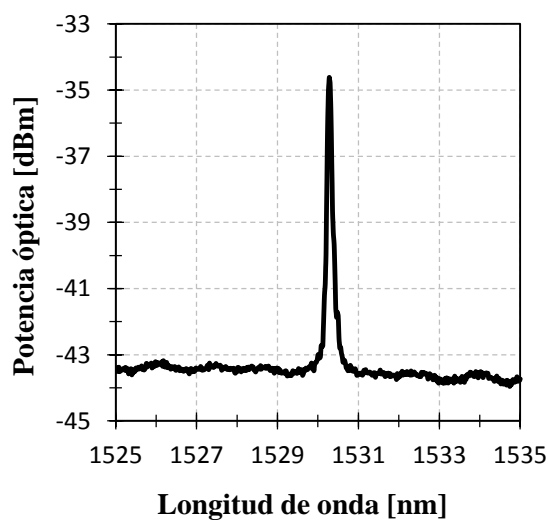
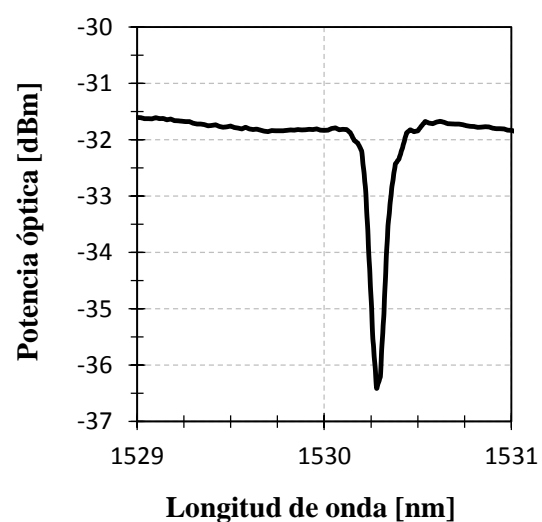


Figura 4.9. Red de difracción de Bragg

En el desarrollo de la fuente de luz multilambda propuesta en el presente trabajo se han usado dos redes de Bragg conectadas en serie. La primera de ellas con una longitud central de 1530.3nm y la segunda de 1552.5nm. A continuación, se presentan los espectros en transmisión y recepción de ambas redes.



(a)



(b)

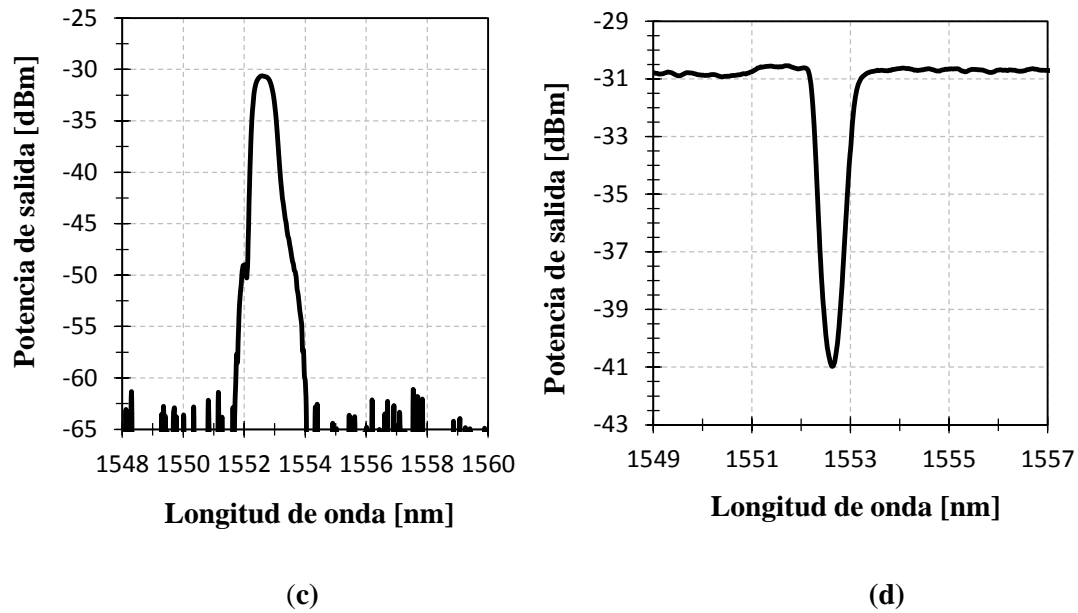


Figura 4.10. Espectros de caracterización de las redes de Bragg en reflexión (a) y (c) y en transmisión (b) y (d) a 1530.3 y 1552.5 nm. Resolución 0.05nm.

Uno de los parámetros característicos de las FBGs es la reflectividad, parámetro que relaciona la potencia reflejada con respecto a la potencia incidente. En el caso de la FBG con $\lambda_B = 1530.3$ nm el valor de la reflectividad es del 81.8 % y en el caso de la de la red con $\lambda_B = 1552.5$ nm el valor de la reflectividad es del 86 %.

4.2.6. Circuladores ópticos

Una vez seleccionadas las longitudes de onda de operación de la fuente de luz, correspondientes a las reflexiones de las redes de Bragg, es necesario reintroducir las mismas en la configuración en anillo y asegurar el funcionamiento de dicha configuración en una única dirección. Para ello se ha utilizado un circulador óptico de tres puertos, modelo CIR-3-155-P-09-1-FC/APC de la marca Optilink, de fibra monomodo de sílice con conectores FC/APC, ver Fig.4.11.



Figura 4.11. Circulador óptico de tres puertos

En el puerto uno del circulador se introducirá la señal obtenida a la salida del multiplexor y se encaminará hacia el puerto dos donde se encontrará con las FBGs conectadas en serie para finalmente reintroducir de nuevo en la configuración en anillo las reflexiones de dichas FBGs obtenidas a la salida del puerto 3.

Para identificar las características exactas del circulador, se ha procedido a realizar un estudio del espectro de salida de los puertos 2 y 3 en comparación con el espectro de entrada correspondiente con el de la BLS, ver Fig.4.12. Además, se han calculado las pérdidas reales de inserción teniendo en cuenta el efecto de los conectores y la longitud de los latiguillos de fibra utilizados para la caracterización. Obteniendo unos resultados de 3.6 dB entre el puerto 1 y el puerto 2 y de 9.8 dB entre el puerto 2 y el puerto 3.

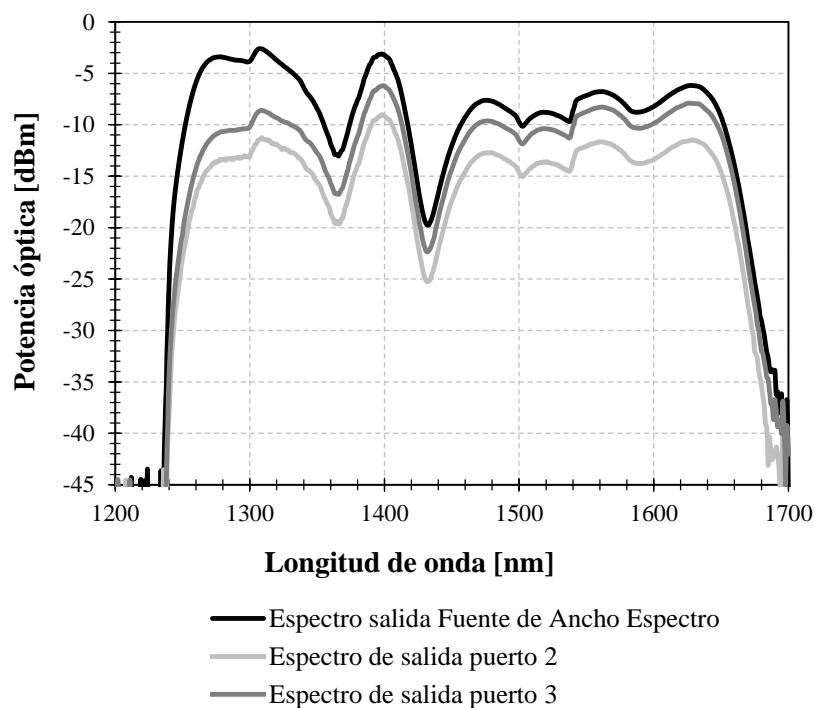


Figura 4.12. Espectro óptico de los puertos 2 y 3 del circulador. Resolución 0.05 nm.

En el presente trabajo ha sido necesaria la utilización de un segundo circulador óptico, el modelo 6015-3-APC de la marca Thorlabs ver Fig.4.13. En este caso para evitar que ciertas reflexiones alcanzaran la fuente de ancho espectro y resultara dañada. Aunque esta función sería más propia de un aislador óptico como el que se ha descrito en el Capítulo 3, se optó por usar un circulador al comprobar que el comportamiento del único aislador disponible en el laboratorio no era el esperado y ofrecía unas pérdidas de inserción inadmisibles para la aplicación que aquí se propone.

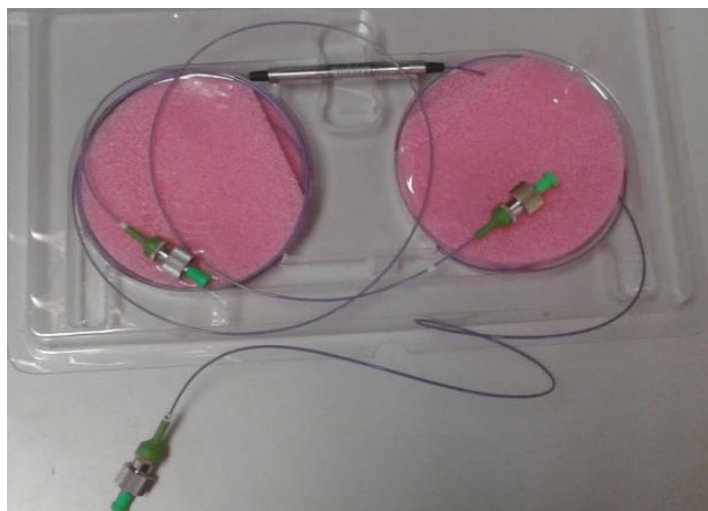


Figura 4.13. Circulador óptico de tres puertos

Igual que en el caso anterior para identificar las características exactas del circulador, se ha realizado un estudio del espectro de salida del puerto 2 y el puerto 3 en comparación con el espectro de entrada correspondiente con el de la BLS, ver Fig.4.14. Además, se han calculado las pérdidas reales de inserción teniendo en cuenta el efecto de los conectores y la longitud de los latiguillos de fibra utilizados para la caracterización, obteniendo unas pérdidas de inserción de ~20 dB entre el puerto 1 y el puerto 2 y de ~42 dB del puerto 2 al puerto 3. Aunque las pérdidas de inserción son elevadas, son inferiores a las que ofrecía el aislador óptico disponible.

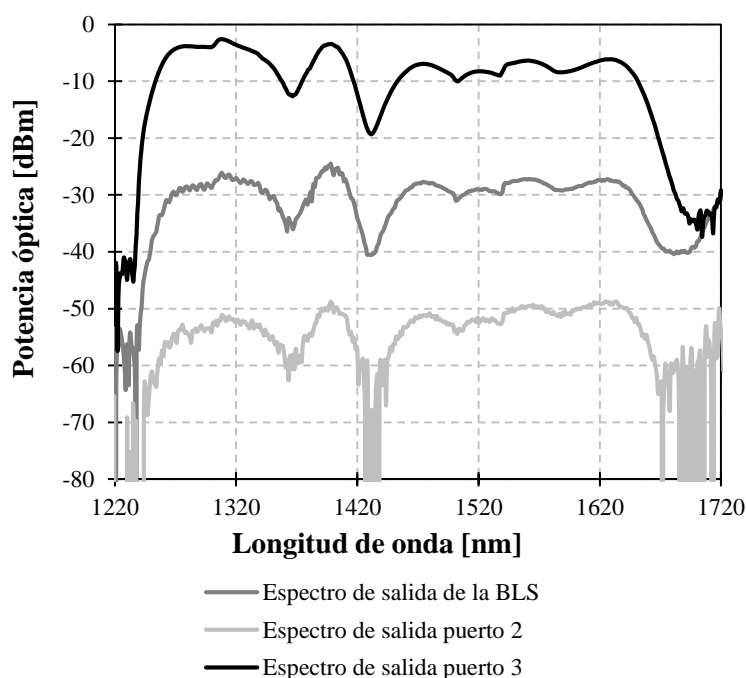


Figura 4.14. Espectro óptico de los puertos 2 y 3 del circulador. Resolución 0.05 nm.

4.2.7. Amplificador óptico semiconductor

Debido a las pérdidas de inserción que sufre la señal óptica al atravesar cada uno de los dispositivos que forman parte del sistema, surge la necesidad de utilizar un SOA que permita amplificar las longitudes de onda de operación de la fuente de luz multilambda y obtener unos niveles óptimos de potencia óptica a la salida del sistema. El SOA utilizado es de la marca Alphion modelo SAC20m 07P427, ver Fig.4.15.



Figura 4.15. Amplificador óptico semiconductor, Alphion SAC20m 07p427

Para caracterizar el comportamiento del amplificador óptico semiconductor, primero se ha determinado el rango espectral de trabajo del mismo así como su comportamiento en función de la longitud de onda. Posteriormente, se ha realizado un estudio de la amplificación de la señal óptica, centrada en el rango espectral de emisión de la fuente de luz multilínea propuesta, en función de la corriente ya que como se explicó en el Capítulo 3 este tipo de amplificadores ópticos son controlados a través de una corriente de bombeo.

En la Fig.4.16 se muestran los espectros completos a la salida del SOA correspondientes a unas corrientes de 100 y 200 mA. Se aprecia que en función de los valores de la corriente, el ancho de banda espectral y el nivel de potencia óptica de salida de la fuente serán mayores o menores como era de esperar. Centrando el análisis en el espectro generado con una corriente de bombeo de 200 mA, se distinguen tres zonas: la primera desde 1500 a 1560 nm aproximadamente en la cual la potencia crece a medida que aumenta el valor de la longitud de onda, la segunda desde 1560 a 1620 nm donde el nivel de potencia puede considerarse casi constante para todas las longitudes de onda y la tercera a partir de 1620 nm donde el nivel de potencia decrece a medida que aumenta el valor de la longitud de onda. A la vista de estos resultados lo óptimo hubiera sido que el sistema trabajase en el rango de máxima amplificación, pero como se explicó anteriormente existía una limitación impuesta por las redes de Bragg disponibles para el desarrollo del proyecto.

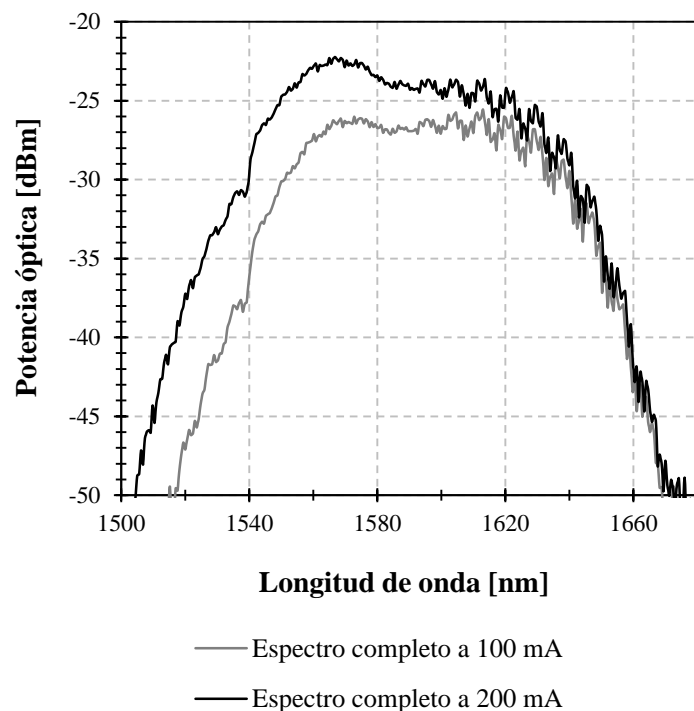


Figura 4.16. Espectro completo a la salida del Amplificador óptico semiconductor. Resolución 0.05 nm

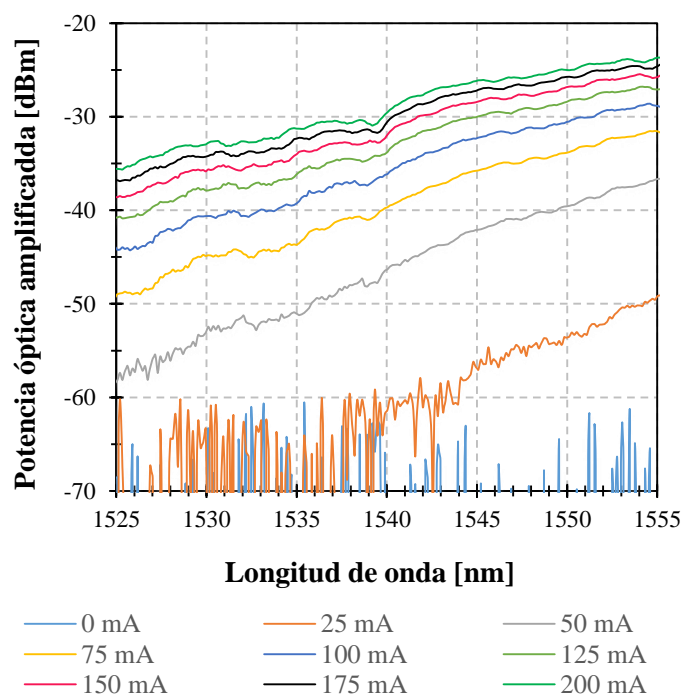


Figura 4.17. Espectro a la salida del Amplificador óptico semiconductor en función de la corriente de bombeo concretado en el rango espectral de la fuente de luz multilambda. Resolución 0.05 nm.

Finalmente, para centrar el estudio en el rango espectral correspondiente a la fuente de luz multilínea nos fijamos en la Fig.4.17, donde se observa cómo se amplifican la señal ópticas de manera proporcional al valor de la corriente, consiguiendo amplificarla unos 30 dB

aproximadamente con respecto a su valor inicial. Notar que como se explicó anteriormente, debido a la zona del espectro donde trabaja el sistema no todas las longitudes de onda se amplifican por igual para el mismo valor de corriente, siendo un claro ejemplo el caso de la corriente de 25 mA donde la señal a 1552.5 nm es amplificada mientras que a 1530.3 nm no.

4.2.8. Acoplador 2x2

Uno de los puntos importantes en el sistema es el lazo de realimentación que se produce a la hora de mezclar la señal óptica reflejada por las redes de Bragg y la señal óptica generada por la fuente de ancho espectro. Las potencias procedentes de ambas señales se reintroducen en el sistema a través de un acoplador con dos entradas y dos salidas, ver Fig.4.18. Este acoplador es el modelo WBC-22-155-10-09-1-FC/APC-C1 de la marca Go4Fiber y utiliza fibra monomodo de sílice con conectores FC/APC. En cada una de las entradas del acoplador se conectan las señales de salida procedentes de la reflexión de las redes de Bragg y la fuente de ancho espectro. La salida del acoplador asociada a la máxima potencia de acoplo es la salida utilizada para reinyectar la potencia al lazo cerrado y así realimentar el circuito. Por otro lado, la salida de menor potencia de acoplo será la encargada de ofrecer al usuario el espectro final de la fuente de luz multilambda. En ella se observarán las distintas longitudes de onda filtradas por el sistema.



Figura 4.18. Acoplador óptico

Para poder identificar las características exactas del acoplador, se ha procedido a realizar un estudio de la respuesta del acoplador en cada uno de sus puertos. Para ello se ha introducido una fuente de ancho espectro en cada una de las entradas y se ha representado el espectro en cada una de las salidas. A partir de la caracterización mostrada en la Fig.4.19 se han obtenido las pérdidas de inserción, coeficiente de acoplo y respuesta en longitud de onda del dispositivo.

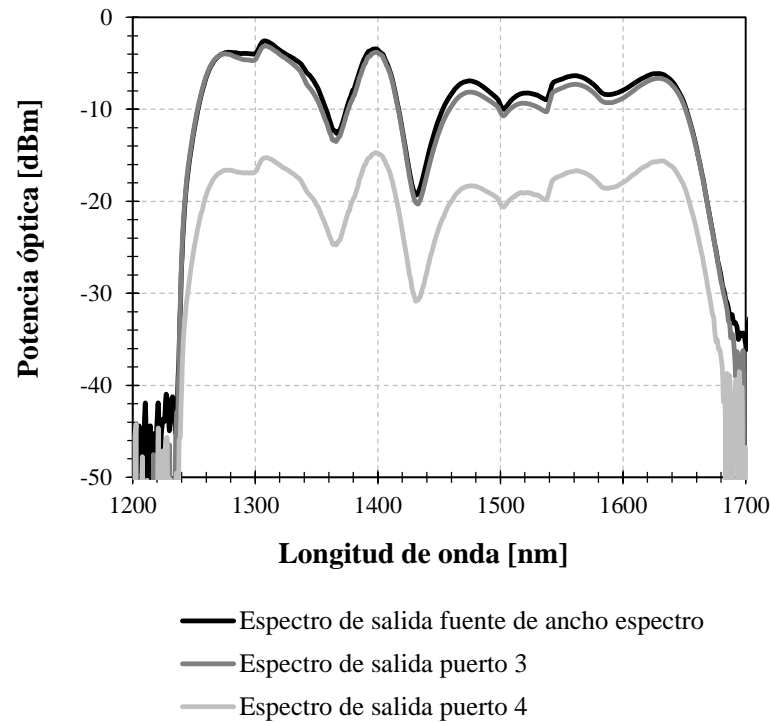


Figura 4.19. Espectro óptico de los puertos de salida del acoplador. Espectro de la fuente de ancho espectro utilizada para caracterizar el dispositivo. Resolución 0.05 nm

Las pérdidas de inserción del acoplador entre el puerto de entrada número uno y los puertos de salida tres y cuatro son 0.9 dB y 10.8 dB, respectivamente. Se aprecia un incremento sustancial de las pérdidas de inserción correspondiente al puerto de salida al que corresponde el 10% del total de potencia de entrada al acoplador, mientras que el puerto de salida correspondiente al 90% tiene menores pérdidas de inserción. Este procedimiento se ha realizado utilizando el puerto de entrada número dos como puerto de entrada de caracterización. El resultado final fueron pérdidas de inserción mayores que cuando se usaba el puerto número uno como entrada.

4.3 Monitorización del espectro de salida de los elementos del sistema

En este apartado se mostrará la trayectoria que sigue la señal óptica a través del esquema utilizado para implementar la fuente de luz multilambda. Para ello se monitorizará el espectro óptico de salida de cada uno de los elementos que forman parte del esquema de la fuente de luz.

En la Fig.4.20, se pueden ver tanto los puntos de monitorización, como los dos circuladores, el acoplador, los dos atenuadores variables, el demultiplexor, el multiplexor, el amplificador óptico y el par de redes de Bragg centradas en la tercera ventana de comunicaciones que integran el sistema.

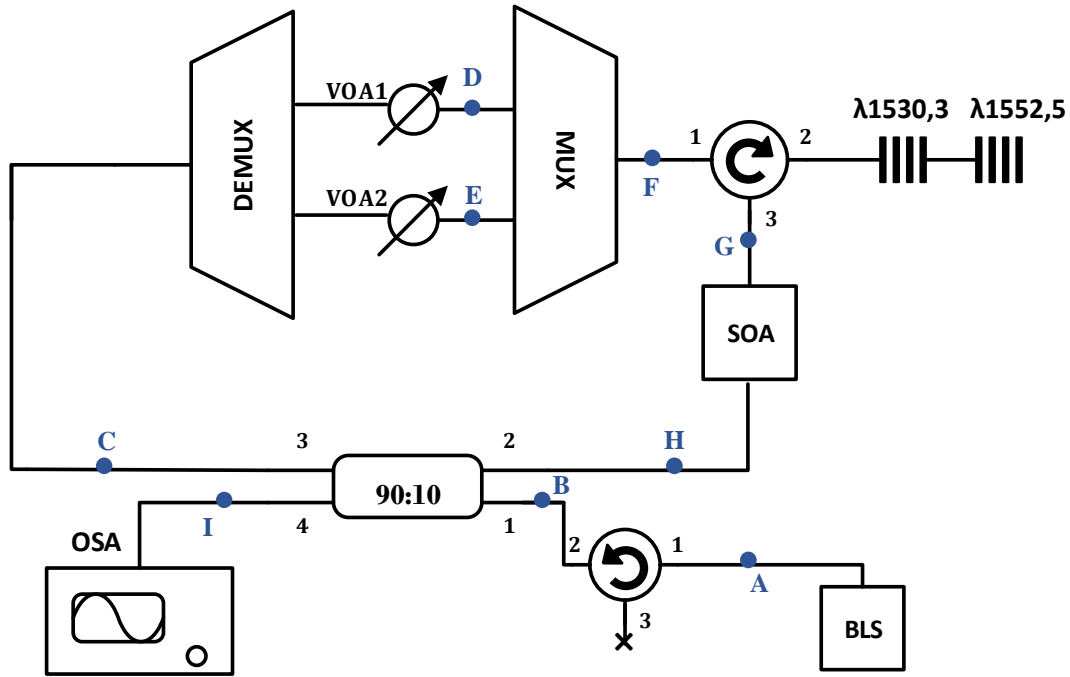


Figura 4.20. Esquema de la configuración experimental de la fuente de luz multilambda

A lo largo de los siguientes párrafos se irá describiendo de forma ordenada y coherente cada uno de los elementos del sistema. Se mostrará el espectro de salida de cada uno de ellos además de describir la forma de conectarlos y las características que ofrecen al esquema.

4.3.1. Salida de la fuente de ancho espectro

Con el fin de inyectar potencia óptica en la configuración en anillo se introduce la salida de la BLS (Punto A) en la misma. En la Fig.4.21, se observa el espectro a la salida de la BLS que como es lógico se corresponde con el espectro ya mostrado en el apartado de caracterizaciones.

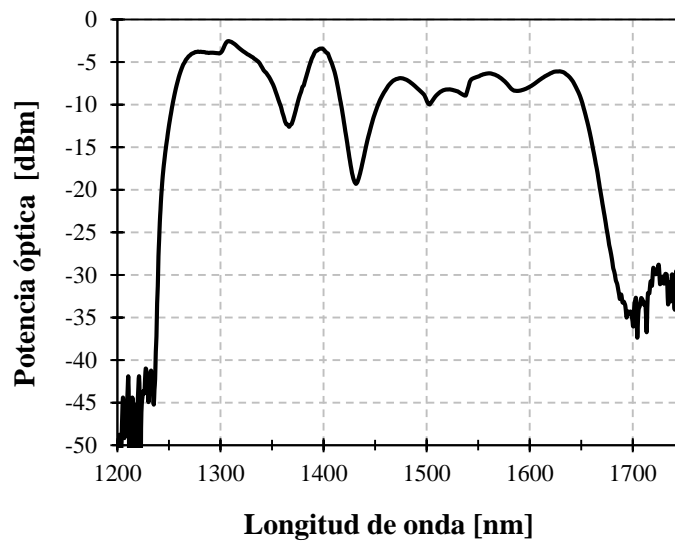


Figura 4.21. Espectro visualizado en el punto A. Resolución 0.05nm

4.3.2 Salida del puerto 2 del circulador óptico

Tratando de evitar que determinadas reflexiones puedan dañar la fuente de ancho espectro se conecta la salida de la BLS a la entrada (Puerto 1) de un circulador óptico que sólo dejará pasar la luz en un sentido, hacia la salida del mismo (Puerto 2, Punto B). En la Fig.4.22, se puede observar la señal óptica en el Punto B atenuada ~20 dB con respecto a la señal visualizada en el Punto A, debido a las pérdidas de inserción introducidas por el circulador óptico, más las producidas por los adaptadores y latiguillos usados para conectar la salida de la BLS con el circulador óptico.

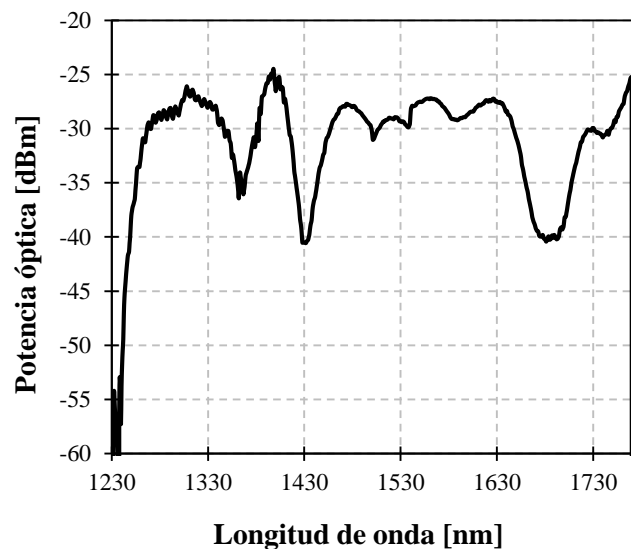


Figura 4.22. Espectro visualizado en el punto B. Resolución 0.05nm

4.3.3. Espectro de salida del acoplador

Evitadas las reflexiones de potencia causantes de un posible deterioro de la fuente de ancho espectro, se conecta a la salida del circulador óptico (Puerto 2) un acoplador óptico de dos entradas y dos salidas. La salida del circulador (Puerto 2, Punto B) se conectará a una de las entradas del acoplador (Puerto 1, Punto B) con el fin de inyectar toda la potencia óptica procedente de la fuente de ancho espectro al sistema. La segunda salida del acoplador (Puerto 2, Punto H) será la encargada de recibir la potencia óptica filtrada y amplificada por las FBGs y el SOA, respectivamente. Con ello se pretende cerrar el lazo de realimentación del sistema.

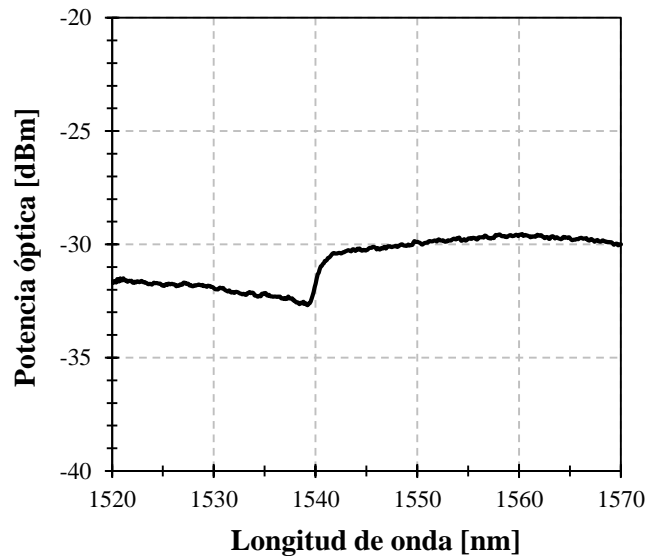


Figura 4.23. Espectro visualizado en el Punto C. Resolución 0.05 nm.

El acoplador utilizado para tal efecto tiene un coeficiente de acoplo del 90%, por lo tanto, la potencia de salida del acoplador en cada rama será del 90% y 10% del total de potencia inyectada en la entrada. Con el fin de obtener la mayor potencia a la salida del sistema, la salida correspondiente al 90 % de la potencia de entrada del acoplador (Puerto 3, Punto C) se conectará al terminal de entrada del bucle de realimentación, es decir, se conectará a la entrada del demultiplexor óptico (Puerto *Int*, Punto C). El espectro de salida del acoplador inyectado al bucle se puede observar en la Fig.4.23. En el espectro mostrado en la figura se muestra cómo el acoplador no altera el rango de longitudes de onda en la franja de trabajo de la fuente de luz multilambda comprendida entre 1520 a 1570nm. Finalmente, la segunda salida del acoplador (Puerto 4, Punto I) será la encargada de entregar la señal óptica multilambda al usuario. El espectro de salida se mostrará en los siguientes subapartados.

4.3.4. Salida del demultiplexor. Canales centrados en 1530 y 1550 nm

Recibiendo a la entrada del demultiplexor (Puerto *Int*) el 90% de la potencia óptica reinyectada al anillo a través de la primera salida del acoplador óptico (Puerto 3, Punto C), el demultiplexor actuará como filtro separando la señal de entrada en distintas señales de salida centradas en diferentes longitudes de onda. En las Fig.4.24 y Fig.4.25 se puede ver cómo la señal de entrada (señal en el Punto C) ha sido filtrada dando lugar a los canales centrados en 1530 (Punto D) y 1550 nm (Punto E) cuya anchura espectral es ~20 nm. En ambos casos, se percibe una pequeña atenuación debida a las pérdidas de inserción. Ambos canales podrán ser ecualizados de manera independiente gracias a los VOAs conectados a la salida de cada canal.

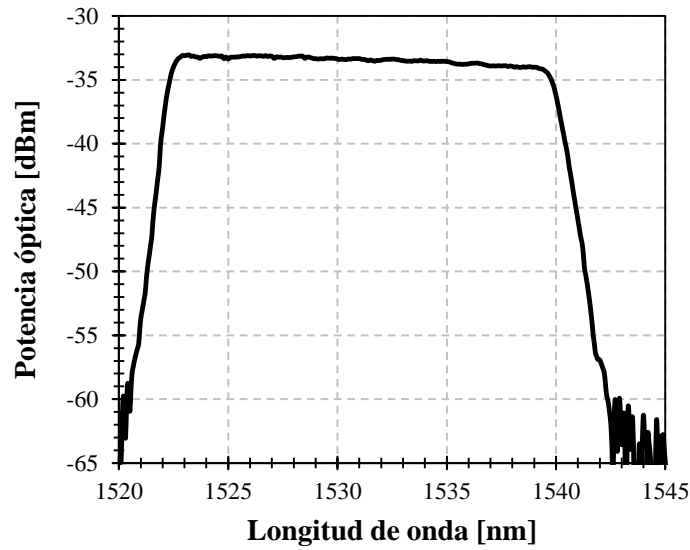


Figura 4.24. Espectro visualizado en el punto D. Resolución 0.05 nm.

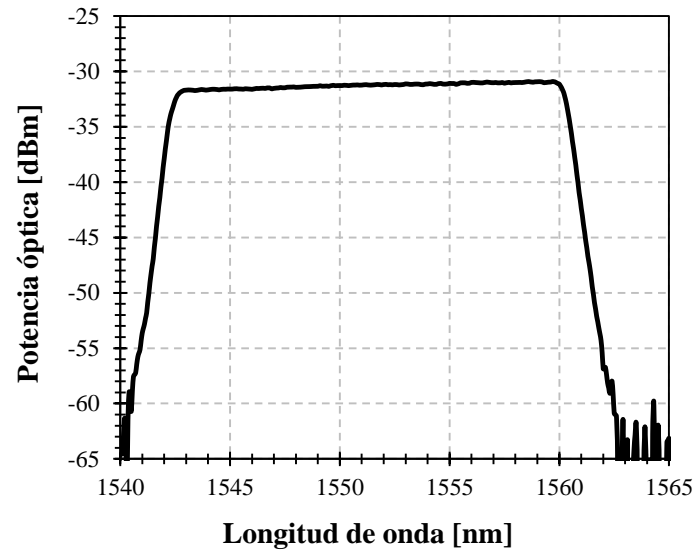


Figura 4.25. Espectro visualizado en el punto E. Resolución 0.05 nm

4.3.5. Salida del multiplexor

Una vez filtrado el espectro inicial, obteniendo varios canales (Puntos D y E) en el rango espectral donde se pretende que trabaje la fuente de luz multilambda. Es necesario unificar ambos en una única señal (Puerto *Out*, Punto F).

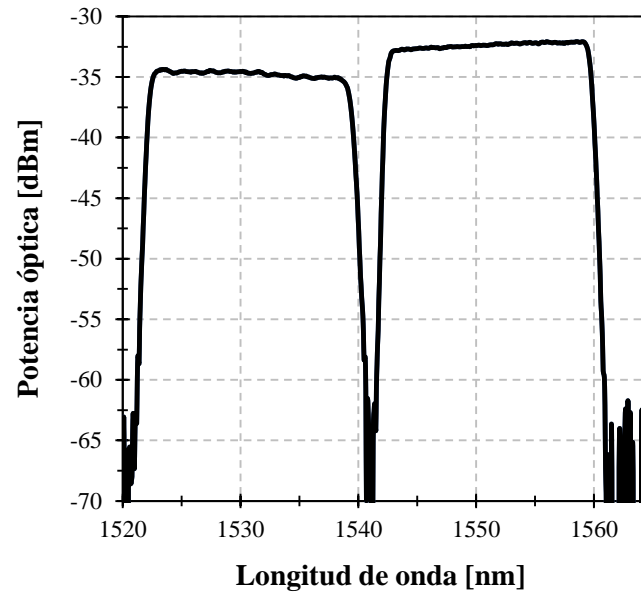


Figura 4.26. Espectro visualizado en el punto F. Resolución 0.05 nm.

Como se puede ver en la Fig.4.26., los dos canales centrados en 1530 y 1550 nm se juntan en una única señal a la salida del multiplexor (Puerto *Out*, Punto F). Igual que en los casos anteriores, la señal sufre una pequeña atenuación debida a las pérdidas de inserción del multiplexor.

4.3.6. Salida del puerto 3 del circulador óptico

Con el fin de seleccionar las longitudes de onda a las cuales trabajará la fuente de luz multilambda, se conecta la salida del multiplexor (Puerto *Out*) con el Puerto uno de un circulador óptico que encaminará la señal óptica hacia su puerto dos donde atravesará la redes de Bragg en serie que funcionarán como filtro multilambda reflejando determinadas longitudes de onda. Será a la salida del puerto tres del circulador (Punto G) donde se obtenga la señal reflejada por las FBGs. Como se puede ver en la Fig.4.27, presenta dos picos situados en las longitudes de onda centrales de ambas redes, uno en 1530.3 nm y el otro en 1552.5 nm. Cada línea de emisión tiene distintos niveles de potencia, esto es debido a que todavía no se han ajustado correctamente los VOAs que permiten su ecualización.

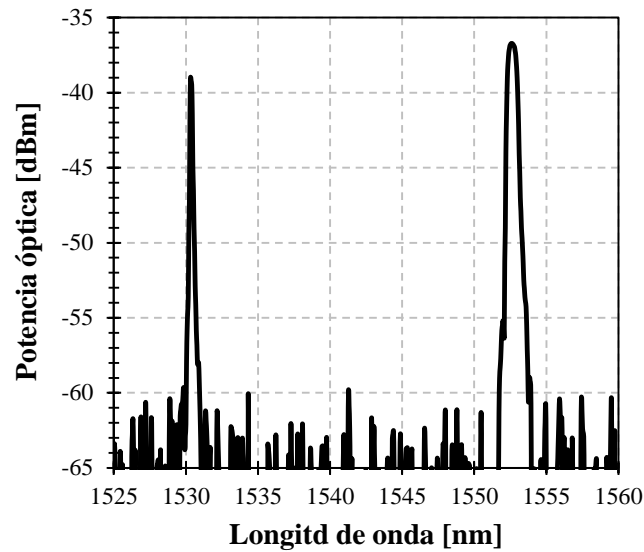


Figura 4.27. Espectro visualizado en el Punto G. Resolución 0.05 nm

4.3.7. Salida del amplificador óptico semiconductor

La salida del circulador (Puerto 3, Punto H) se conecta a un amplificador óptico semiconductor con el fin de contrarrestar las pérdidas de potencia de las líneas de emisión de la fuente de luz multilambda producidas por cada uno de los elementos que forman parte del anillo.

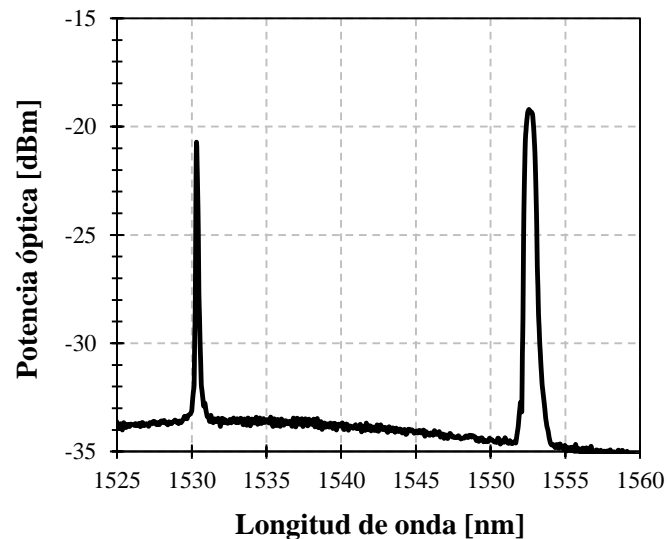


Figura 4.28. Espectro visualizado en el Punto H. Resolución 0.05 nm

Como se aprecia en la Fig.4.28., se obtiene a la salida del SOA una señal óptica que ha sido amplificada 18 dB aproximadamente con respecto a la señal de entrada (señal mostrada en el punto G). No obstante, la corriente del SOA era de 100 mA y la señal todavía no había sido

ecualizada ajustando los VOAs, de ahí que la amplificación no fuera la óptima, pero si suficiente para observar el papel que desempeña el SOA.

4.3.8. Salida del sistema completo

Por último, queda visualizar la señal óptica que ofrecerá la fuente de luz multilambda propuesta al usuario, a través de la segunda salida del acoplador óptico (Puerto 4, Punto I). Ver Fig.4.29.

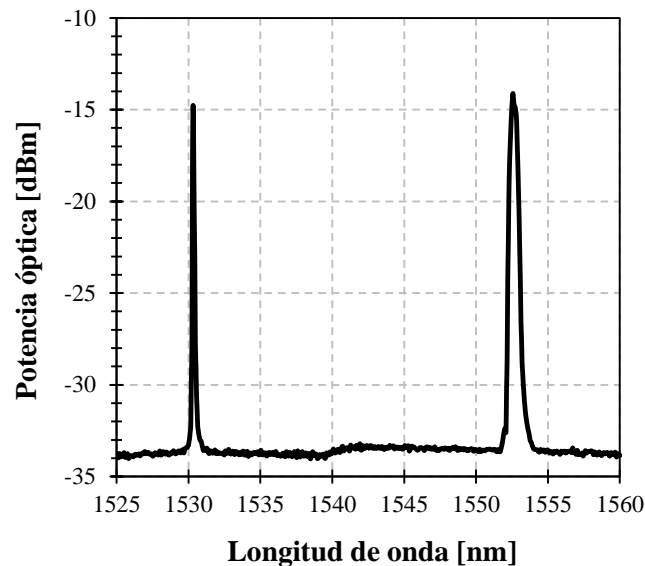


Figura 4.29. Espectro visualizado en el Punto I. Resolución 0.05 nm

En comparación con la salida en el punto H, en este caso los VOAs ya se han ajustado con el fin de conseguir que ambas líneas de emisión tuvieran el mismo nivel de potencia. Como resultado, se ha obtenido un nivel de -15 dBm aproximadamente para ambas.

Notar que existe una diferencia de 10 dB con respecto a la salida del sistema que se obtuvo durante la realización del estudio de estabilidad que se mostrará a continuación. Se observó que era debido a que el sistema era muy sensible al radio de curvatura de las fibras, a variaciones en las longitudes de los tramos de fibra y al número de adaptadores, aumentando las pérdidas y empeorando la estabilidad del mismo. Se intentaron minimizar esos efectos hasta lograr el nivel de potencia óptica de salida de -4 dBm mostrado en el estudio de estabilidad.

4.4 Resultados experimentales

Una vez desarrollada la fuente de luz multilambda se analizaron los principales problemas que presentaba: la ecualización de las amplitudes de cada longitud de onda y la estabilidad del sistema.

4.4.1. Ecualización

Uno de los requisitos del sistema era que todas las línea de emisión de la fuente de luz tuvieran la misma ganancia. Utilizando un atenuador óptico variable por cada canal se consiguió igualar esa ganancia. No obstante, al ecualizar, se perdió parte de la potencia de cada señal.

4.4.2. Estabilidad

La estabilidad de un sistema hace referencia a la medida de la variación de la potencia óptica con respecto a la media de los valores medidos durante un intervalo de tiempo determinado. El parámetro estadístico que nos permite el cálculo de la estabilidad del sistema es la desviación típica. Por tanto, entenderemos que el sistema oscilará menos cuando menor sea el valor de desviación típica.

En el laboratorio se observó que utilizando acopladores con distinto coeficiente de acoplo variaba la estabilidad del sistema. Con el fin de estudiar en qué medida el uso de un acoplador en lugar de otro influiría en la obtención de un sistema más estable, se han tomado medidas del espectro de cada canal cada 2 segundos durante un intervalo de tiempo de 60 segundos usando acopladores con coeficiente de acoplo 90:10, 50:50 y 10:90.

4.4.2.1 Coeficiente de acoplo de 90:10

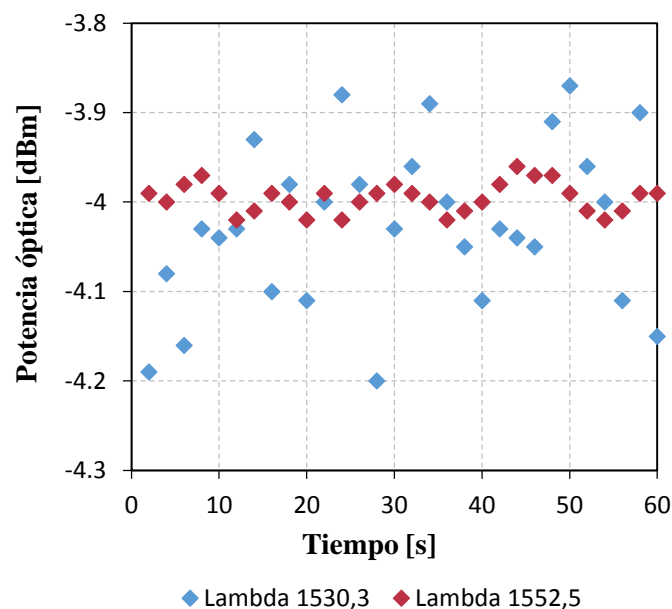


Figura 4.30. Valores de inestabilidad del acoplador 90:10

Se observa que en un intervalo de tiempo determinado, la potencia para las dos líneas de emisión varía dentro de un rango. Para $\lambda_1=1530.3$ nm entre -4.2 y -3.87 dBm y para $\lambda_2=1552.5$

nm entre -4.02 y -3.96 dBm. La desviación típica máxima del sistema para un coeficiente de acoplo de 90:10 es de 0.1dB. Este valor se corresponde con una longitud de onda de 1530.3nm.

| | Potencia Media [dBm] | Potencia mínima [dBm] | Potencia máxima [dBm] | Desviación típica [dB] |
|--------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|
| $\lambda_1= 1530.3$ [nm] | -4.02 | -4.2 | -3.87 | 0.09 |
| $\lambda_2= 1552.5$ [nm] | -3.99 | -4.02 | -3.96 | 0.01 |

Tabla 4.3. Parámetros característicos del sistema usando acoplador 90:10: potencia media, mínima, máxima y desviación típica.

Observando la gráfica anterior, se intuye que $\lambda_2=1552.5$ nm es más estable que $\lambda_1=1530.3$ nm. El valor de la desviación típica, parámetro que muestra la variabilidad de los datos, confirma que es más estable.

4.4.2.2 Coeficiente de acoplo de 50:50

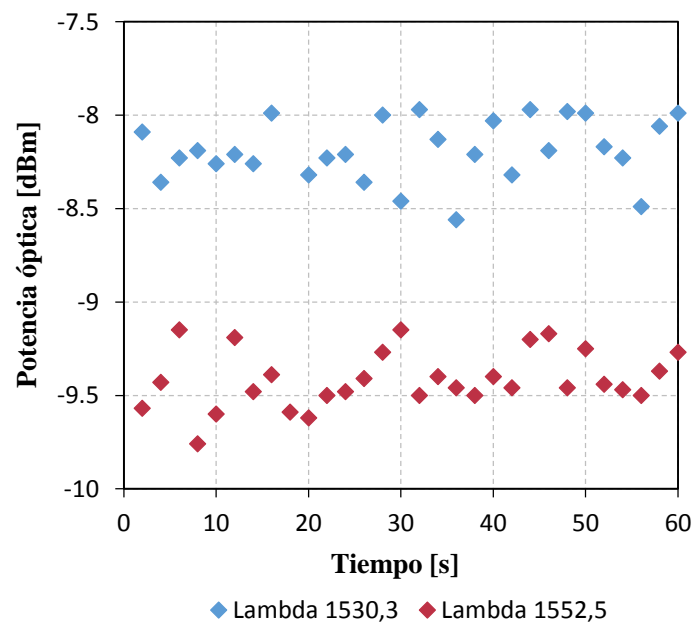


Figura 4.31. Valores de inestabilidad del acoplador 50:50

Usando el acoplador con coeficiente de acoplo 50:50 la potencia disminuye 4 dB aproximadamente con respecto al primer caso. Ahora, para $\lambda_1=1530.3$ nm la potencia varía entre -8.56 y -7.28 dBm y para $\lambda_2=1552.5$ nm entre -9.76 y -9.15 dBm. La desviación típica del sistema para un coeficiente de acoplo de 50:50 es inferior a 0.3 dB. Este valor se corresponde con una longitud de onda de 1530.3nm.

| | Potencia Media [dBm] | Potencia mínima [dBm] | Potencia máxima [dBm] | Desviación típica [dB] |
|--------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|
| $\lambda_1= 1530.3$ [nm] | -8.15 | -8.56 | -7.28 | 0.23 |
| $\lambda_2= 1552.5$ [nm] | -9.41 | -9.76 | -9.15 | 0.15 |

Tabla 4.4. Parámetros característicos del sistema usando acoplador 50:50: potencia media, mínima, máxima y desviación típica.

Igual que en el caso anterior, el resultado de la desviación típica indica que se mantiene la tendencia donde la longitud de onda de $\lambda_2=1552.5$ nm es más estable que $\lambda_1=1530.3$ nm.

4.4.2.3 Coeficiente de acoplo de 10:90

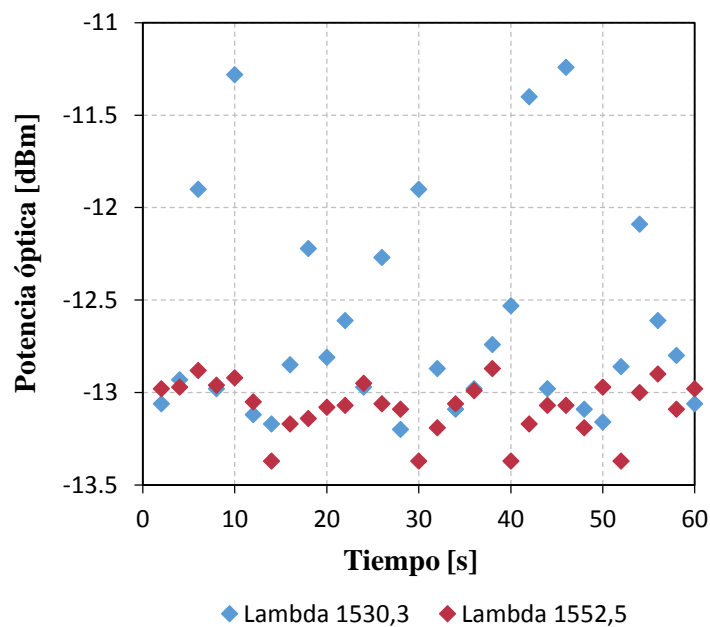


Figura 4.32. Valores de inestabilidad del acoplador 10:90

En este último caso, para $\lambda_1= 1530.3$ nm la potencia varía en un rango entre -13.2 y -11.24 dBm y para $\lambda_2= 1552.5$ nm varía en un rango entre -13.37 y -12.87 dBm. La desviación típica del sistema para un coeficiente de acoplo de 10:90 es inferior a 0.6 dB. Este valor se corresponde con una longitud de onda de 1530.3nm.

| | Potencia Media [dBm] | Potencia mínima [dBm] | Potencia máxima [dBm] | Desviación típica [dB] |
|--------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|
| $\lambda_1= 1530.3$ [nm] | -12.63 | -13.2 | -11.24 | 0.57 |
| $\lambda_2= 1552.5$ [nm] | -13.08 | -13.37 | -12.87 | 0.14 |

Tabla 4 5. Parámetros característicos del sistema usando acoplador 10:90: potencia media, mínima, máxima y desviación típica.

Se corrobora de nuevo que $\lambda_2=1552.5$ nm es más estable que $\lambda_1=1530.3$ nm. Además, a la vista de los resultados obtenidos en los tres casos, se puede decir que relaciones de acoplo altas aumentan la potencia de salida y la estabilidad y por tanto la eficiencia del esquema.

Por último, se ha realizado una comparación del espectro del sistema que se obtiene usando cada uno de los acopladores, ver Fig.4.33.

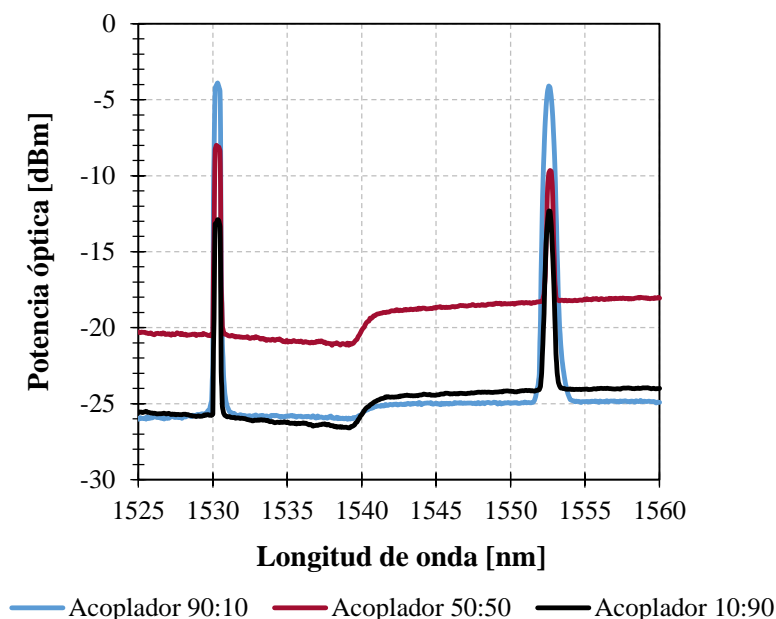


Figura 4.33. Comparación del espectro de la fuente de luz multilambda usando cada acoplador

Teniendo en cuenta el compromiso entre la estabilidad y el nivel de potencia, el acoplador 90:10 es el que mejores prestaciones tiene, ofreciendo un nivel de potencia medio de -4 dBm aproximadamente y la mejor estabilidad con respecto al resto de acopladores presentado una inestabilidad de 0.1 dB.

4.5 Estudio de potencia

En este apartado se realiza un estudio de potencia en distintos escenarios del sistema, concretamente se ha estudiado como varían los niveles de potencia óptica de salida a medida que se eliminan distintos elementos que integran el sistema.

4.5.1. Primer escenario

El esquema del primer escenario incluye todos los elementos, coincidiendo por lo tanto con el montaje que fue mostrado en la Fig.4.20.

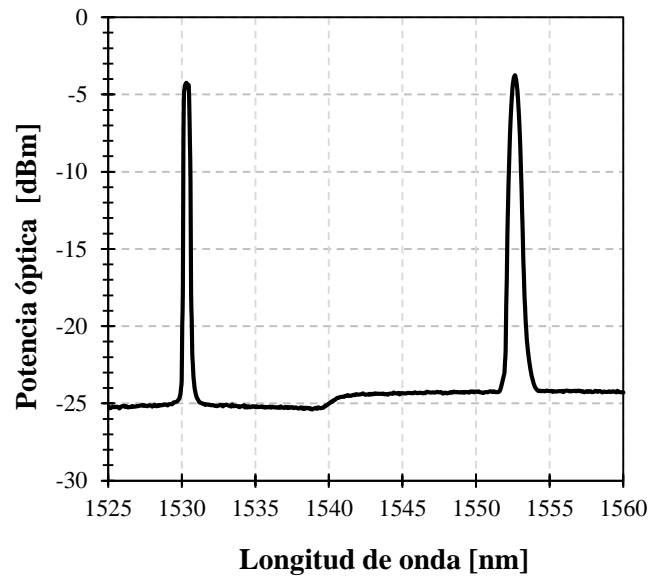


Figura 4.34. Señal óptica de salida del primer escenario. Resolución 0.5 nm.

En la Fig.4.34., se puede observar que la potencia óptica de salida tiene un valor de -4 dBm aproximadamente para ambas líneas de emisión. Como ya se mencionó anteriormente, conseguir el mismo nivel de potencia es posible gracias a la ecualización de la señal llevada a cabo por los VOAs. No obstante, se aprecia una pequeña diferencia de nivel de potencia entre ambas longitudes de onda que no se consigue resolver totalmente con los VOAs y que se puede atribuir al comportamiento no lineal de la ganancia de los SOAs.

4.5.2. Segundo escenario

En el esquema del segundo escenario se han eliminado las FBGs en serie y el circulador usado para direccionar la reflexión de las mismas.

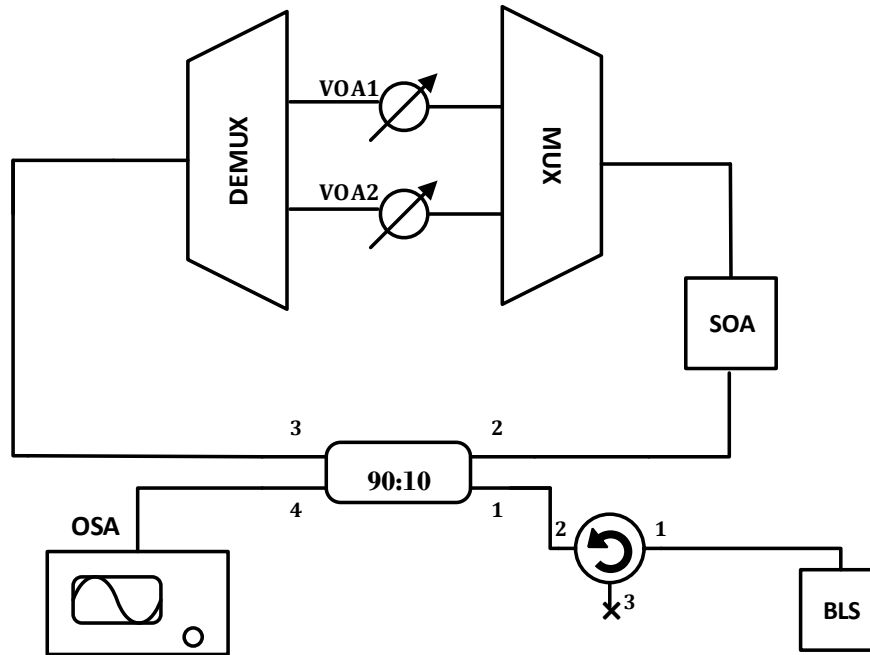


Figura 4.35. Montaje del segundo escenario

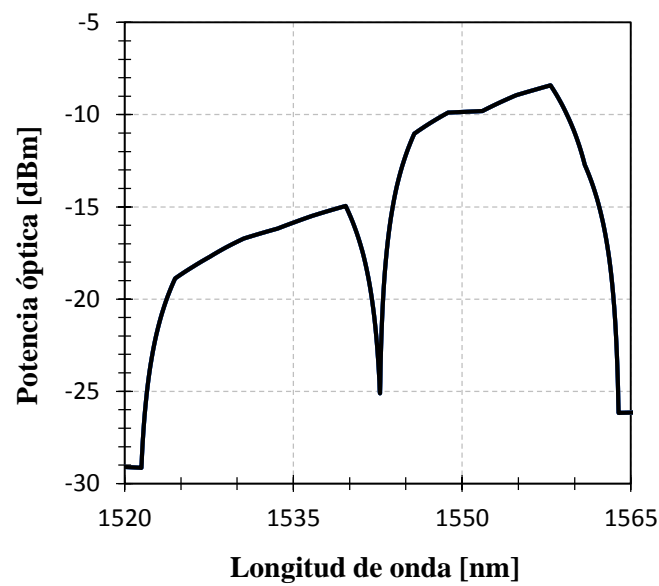


Figura 4.36. Señal óptica de salida del segundo escenario. Resolución 0.5 nm.

A la salida del segundo escenario como se puede ver en la Fig.4.36., se obtiene un menor nivel de potencia de salida. Para $\lambda_2= 1552.5$ nm de -10 dBm y de -17 dBm para $\lambda_1=1530.3$ nm.

4.5.3. Tercer escenario

En el esquema del tercer escenario, a las FBGs y el circulador que ya se habían eliminado en el segundo escenario, se suma la eliminación del multiplexor, el demultiplexor y los VOAs quedando el esquema mostrado en la Fig.4.37.

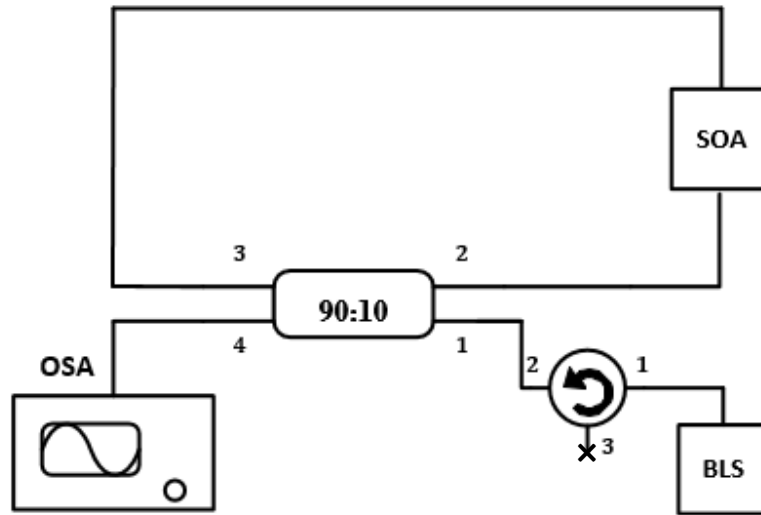


Figura 4.37. Montaje del tercer escenario.

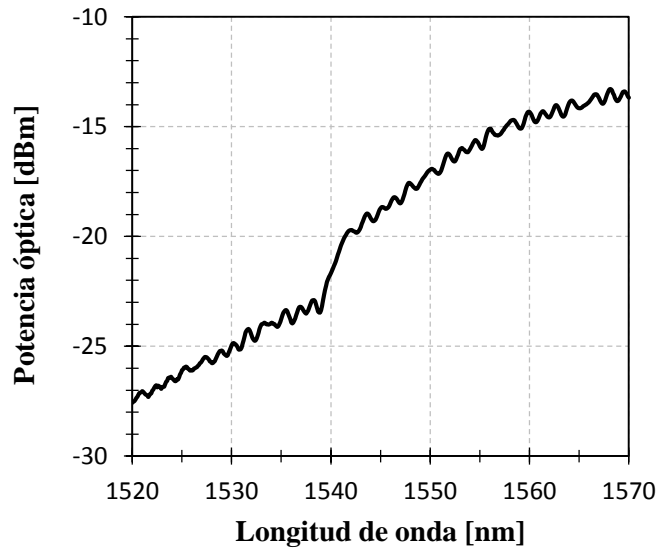


Figura 4.38. Señal óptica de salida del tercer escenario. Resolución 0.5 nm.

Por último, a la salida del tercer escenario como se puede ver en la Fig.4.38., se obtienen niveles de potencia todavía inferiores a los obtenidos en los casos anteriores. Para $\lambda_2=1552.5$ nm de -16 dBm aproximadamente y de -25 dBm para $\lambda_1=1530.3$ nm.

Parecen razonables los resultados obtenidos, si por una parte se tiene en cuenta que cuantos menos elementos integren el circuito menor será el filtrado que discrimine determinadas



longitudes de onda del espectro inicial (1250 a 1650 nm, espectro de salida de la BLS) y por otra que las longitudes de onda compiten unas frente a otras por la potencia existente. Por tanto, es lógico que cuanto mayor sea el filtrado, menor será el número de longitudes de onda que compiten por la misma potencia y como consecuencia aumenta el nivel de potencia a la salida del sistema como ocurre en el primer escenario.

Ha de tenerse en cuenta que los resultados obtenidos se consiguieron con 2 vueltas de los VOAs en los tres escenarios.

Capítulo 5

Capacidad de sintonización usando FBGs

5.1 Fundamentos teóricos

Como ya se explicó anteriormente, la longitud de onda de Bragg está directamente relacionada con el índice de refracción efectivo del núcleo de la fibra (n_{eff}) y el periodo espacial de la red de Bragg (Λ) a través de la siguiente relación $\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda$. A su vez, tanto el índice de refracción efectivo como el periodo de la red, se pueden ver afectados por cambios de temperatura y estiramientos o tensiones que se traducen en desplazamientos de la longitud de onda central de la FBG Eq (5.1) [31].

$$\Delta\lambda_B = 2\left(\Lambda \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T} + n_{\text{eff}} \frac{\partial \Lambda}{\partial T}\right) \Delta T + 2\left(\Lambda \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial l} + n_{\text{eff}} \frac{\partial \Lambda}{\partial l}\right) \Delta l \quad (5.1)$$

El primer término en Eq. (5.1) representa el efecto de la temperatura sobre una fibra óptica, el segundo por su parte, representa el efecto del estiramiento sobre la fibra óptica.

$$\Delta\lambda_{B,T} = \lambda_B (\alpha + \zeta) \Delta T \quad (5.2)$$

El pequeño desplazamiento que tiene lugar debido a cambios de temperatura (ΔT), puede ser definido como en Eq. (5.2), donde $\alpha = (1/\Lambda)(\partial\Lambda/\partial T)$ es el coeficiente de expansión térmica de la fibra ($\sim 0.55 \cdot 10^{-6} (\text{°C}^{-1})$) para el sílice sin dopar) y $\zeta = (1/n)(\partial n/\partial T)$ representa el coeficiente termo-óptico de la fibra ($8 \cdot 10^{-6} (\text{°C}^{-1})$ para el sílice dopado con germanio).

La sensibilidad típica de cambio de la longitud de onda que se puede conseguir en fibras de sílice debido a variaciones de temperatura es de 10 pm/°C [32], con un carácter lineal en un

amplio rango de temperaturas, limitado únicamente por las temperatura de fusión y degradación del tipo de fibra.

5.2 Instrumentación virtual

El concepto de instrumentación virtual tiene su origen en el reemplazamiento de equipos físicos por software, permitiendo a los usuarios interactuar con el PC de la misma manera que lo haría con un instrumento real.

Mientras que en la instrumentación tradicional (véase un osciloscopio o un generador de funciones) es el fabricante el que define la funcionalidad del instrumento impidiendo que el usuario pueda cambiarla, en la instrumentación virtual es el usuario el que puede definir y configurar tanto la interfaz como la funcionalidad, pudiendo posteriormente reconfigurarla o modificarla en función de las necesidades existentes.

Actualmente, entre las principales compañías dedicadas al desarrollo de herramientas de instrumentación virtual se encuentra National Instrument y entre sus principales productos, el software LabVIEW [33].

5.2.1 Software LabVIEW de National Instruments

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) es un lenguaje de programación gráfico que usa iconos en lugar de líneas de texto para crear aplicaciones. A diferencia de los lenguajes de programación basados en texto, donde las instrucciones determinan el orden de ejecución del programa, LabVIEW utiliza “dataflow programming”, un concepto de programación cuyo modelo de ejecución puede ser representado internamente por un grafo parecido a un diagrama de flujo, donde el flujo de datos a través de los nodos del mismo determina el orden de ejecución de los VIs (Virtual Instruments que imitan los instrumentos físicos) y de las funciones [34].

5.2.1.1 Áreas de aplicación y ventajas

El lenguaje de programación LabVIEW dispone de múltiples áreas de aplicación como la adquisición de datos y el procesamiento de señales, el control de instrumentación, la automatización de sistemas de pruebas y validación, sistemas embebidos de monitoreo y control o enseñanza académica entre otros. Entre las ventajas que ofrece destacan su compatibilidad con otras herramientas de desarrollo similares y la posibilidad de integración con hardware.

5.2.1.2 Conceptos básicos de la programación gráfica con LabVIEW

Los ficheros base proporcionados por LabVIEW son conocidos como Virtual Instruments (VIs), debido a que su apariencia y modo de funcionamiento recuerdan a la de instrumentos reales, como pueden ser los osciloscopios o los multímetros.

Un VI contiene los tres siguientes componentes [35]:

Front panel (Panel Frontal): esta pantalla es la interfaz de usuario. En ella se definirán tanto las variables de entrada (conocidas como controles en LabVIEW), como las variables de salida (conocidas como indicadores). Los controles pueden ser desde pulsadores hasta ventanas donde poder introducir un número. Por su parte, los indicadores, pueden ser visualizadores numéricos, gráficas, LEDs, etc.

Block Diagram (Diagrama de Bloques): ventana que contiene el código fuente gráfico (conocido también como código G o código de diagrama de bloque) que define la funcionalidad del programa. A partir de diferentes controladores, constantes, y la interconexión (cableado) de éstos con distintos nodos (funciones), se crea el diagrama de bloques correspondiente al código deseado.

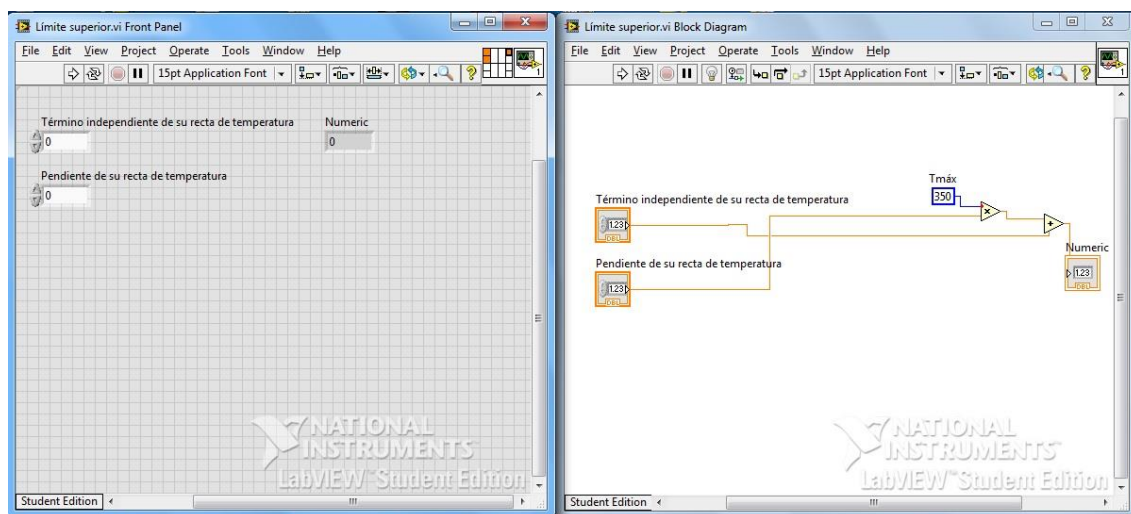


Figura 5.1. Ejemplo de programa en LabVIEW. Panel frontal a la izquierda y diagrama de bloque a la derecha.

Icon and Connector Pane (Icono y panel de conexión): El icono es la representación gráfica del VI. Su principal función es identificar a un VI cuando se usa en otro VI, esto es, cuando pasa a ser un subVI dentro de un VI. Por su parte, el panel de conexión define las entradas y salidas que se pueden cablear al VI para que pueda ser utilizado como subVI. Conjuntamente, el icono y el panel de conexión se corresponden con el prototipo de función definido en los lenguajes de programación basados en texto.



Figura 5.2. Icono (izquierda) y panel de conexión (derecha) de un VI.

Con respecto a la ejecución del código, debe tenerse en cuenta que una tarea no se iniciará hasta tener todas sus variables de entrada o hasta que las tareas predecesoras hayan terminado de ejecutarse. El flujo de datos irá de izquierda a derecha en el Block Diagram, mostrando la ejecución secuencial del programa.

5.3 Desarrollo experimental

5.3.1 Descripción del montaje experimental

El montaje mostrado en la Fig.5.3, es el propuesto para estudiar la capacidad de sintonización de un sistema que integre FBGs aprovechando la dependencia de su longitud de onda central con la temperatura. El montaje se basa en la utilización de un controlador de temperatura encargado de inducir las variaciones de temperatura sobre la FBG. Como el controlador no puede aplicar esas variaciones directamente sobre la FBG, es necesaria la utilización de una placa calefactora (high conductivity metal hot plate) que experimente estos cambios de temperatura y sobre la que se colocará la FBG cuya longitud de onda de reflexión quiere modificarse. Además, es necesario un ordenador para ejecutar el programa implementado en LabVIEW que permite al usuario automatizar el proceso de sintonización y le evite tener que estar variando manualmente la temperatura del controlador.

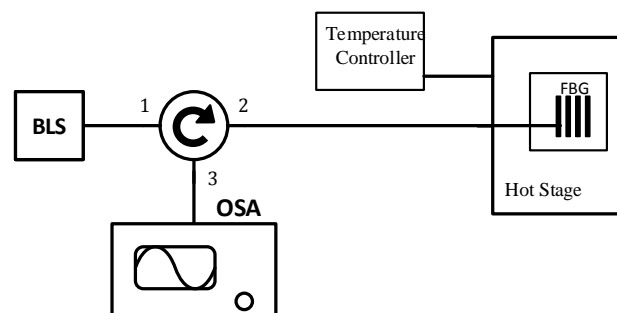


Figura 5.3. Montaje experimental del estudio de sintonización.

5.3.2 Caracterización de las FBGs aplicando variaciones de temperatura

Lo primero, ha sido determinar el rango de sintonización que se puede conseguir usando la red de difracción de Bragg. Para realizar esta comprobación, se han aplicado sobre la FBG variaciones de temperatura comprendidas entre $T_{Ref} = 24\text{ }^{\circ}\text{C}$ (temperatura ambiente) y $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ (temperatura máxima que alcanza la placa calefactora) con incrementos de temperatura de $50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

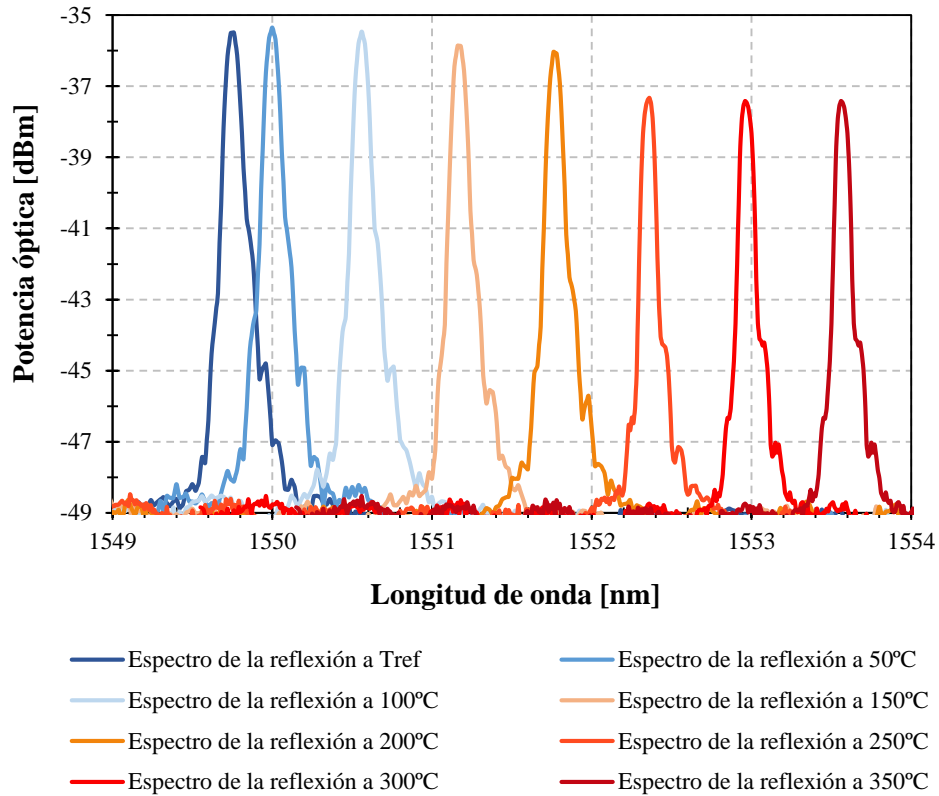


Figura 5.4. Visualización del desplazamiento del espectro de la reflexión de la red de Bragg en función de la temperatura. Resolución 0.05 nm.

Como se puede observar en la Fig.5.4., con el sistema propuesto se dispondría de un rango de sintonización de aproximadamente 3.6 nm. Destacar que aunque la FBG permitiera obtener un rango de sintonización mayor, la limitación del método de sintonización que aquí se presenta viene impuesta por la temperatura máxima que puede alcanzar la placa calefactora.

Una vez definido el rango de sintonización que es capaz de ofrecer la placa calefactora, se procede a realizar un estudio de la variación de la longitud de onda del pico máximo de potencia de la red de Bragg con la temperatura. Para ello, se ha representado en una gráfica la temperatura frente a la longitud de onda, ver Fig.5.5.

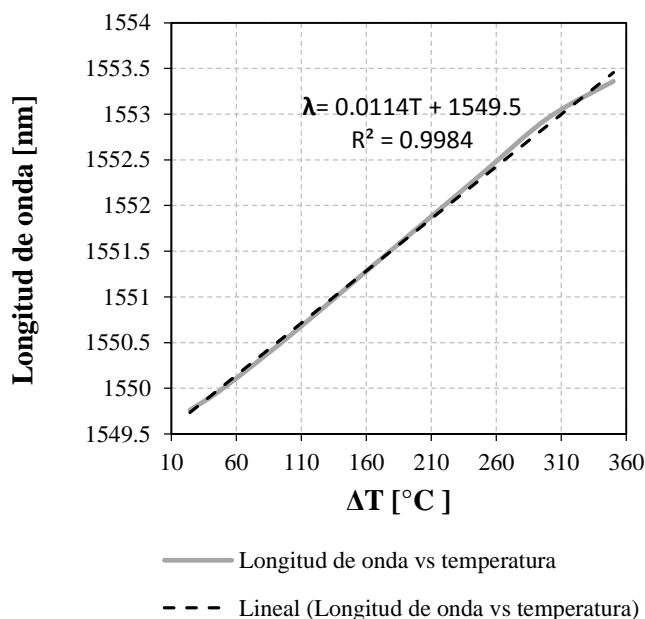


Figura 5.5. Longitud de onda vs Temperatura

Observando la Fig.5.5., se puede afirmar que el comportamiento de los cambios en la longitud de onda debidos a variaciones de temperatura presenta una tendencia lineal ya que se ha obtenido un factor de correlación $R^2=0.9984$ para un ajuste lineal dentro de los límites de temperatura analizados.

Gracias a la ecuación lineal obtenida ($\lambda = 0.0114T + 1549.5$), que modela el comportamiento de los desplazamientos de la longitud de onda central de la FBG debidos a cambios de temperatura y teniendo en cuenta que la temperatura máxima que podrá alcanzar la placa es de 350°C, el programa que a continuación se va a presentar será capaz de determinar el rango de sintonización dentro del cual el usuario podrá elegir una nueva longitud de onda de emisión.

5.3.3 Descripción del programa usado para automatizar la sintonización

Siguiendo el diagrama de flujo representado en la Figura 5.6 se podrá entender el funcionamiento del programa desarrollado para automatizar el proceso sintonización.

Nada más iniciar el programa se muestra una pantalla de interacción con el usuario con el fin de que éste introduzca algunos parámetros necesarios para llevar a cabo la sintonización: la temperatura ambiente, la temperatura actual de la placa calefactora, la pendiente y el término independiente de la recta que caracteriza el comportamiento de los desplazamientos de la longitud de onda central de la FBG con las variaciones de temperatura y la longitud de onda a la cual quiere sintonizar. En esta pantalla el usuario tiene la posibilidad de introducir los datos y seguir con la ejecución normal del programa o acabar con la ejecución del mismo.

Una vez introducidos los datos, el siguiente paso será comprobar que la longitud de onda que quiere el usuario se encuentre dentro del rango de sintonización, el cual será calculado a partir de los datos que introdujo el usuario y teniendo en cuenta que la temperatura máxima que puede alcanzar la placa calefactora son 350°C. Si la nueva longitud de onda de emisión requerida se encuentra dentro del rango de sintonización, el programa seguirá su ejecución normal, sino se informará al usuario de que no es posible sintonizar a esa longitud de onda y se le preguntará si quiere elegir otra longitud de onda de emisión o si por el contrario quiere acabar con la ejecución del programa.

Si es posible sintonizar la longitud de onda, lo siguiente será calcular la temperatura que deberá tener la placa calefactora para conseguir el desplazamiento de la longitud de onda de Bragg deseado. Una vez calculada la temperatura, se comprobará si ésta es mayor que la temperatura actual de la placa para establecer un tiempo de espera determinado dependiendo del resultado de la comprobación, mientras se produce el aumento o la disminución de temperatura necesaria. Durante toda la sintonización se harán barridos para comprobar si el usuario ha pulsado el botón de STOP para parar el proceso, puesto que éste puede durar largos periodos de tiempo (el peor caso serán 60 minutos, tiempo necesario para que la placa se enfríe ya que carece de sistema de refrigeración). Para ello, dividiremos el tiempo de espera en periodos cortos, de forma que el tiempo de respuesta ante la pulsación del botón de STOP no sea significativo.

Cuando se haya conseguido la longitud de onda deseada en caso de no haber parado el proceso de sintonización, se encenderá un LED que informe al usuario de ello. Además, se le preguntará si desea reelegir de nuevo otra longitud de onda, mostrando una vez más la ventana de interacción para que introduzca los nuevos parámetros y apagando el LED en caso afirmativo o acabando con la ejecución del programa en caso negativo.

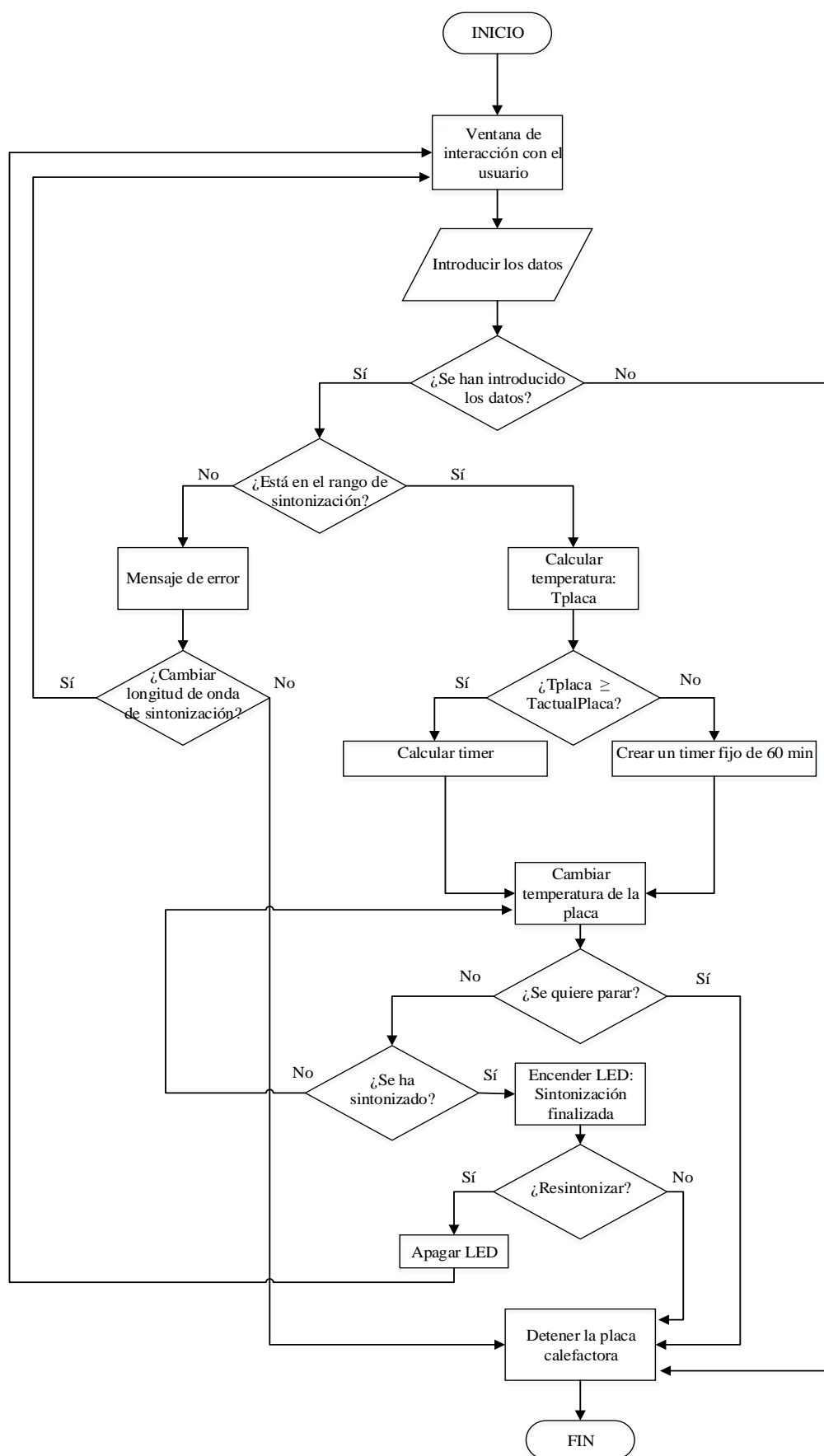


Figura 5.6. Diagrama de flujo de la aplicación desarrollada.

5.3.4 Resultados experimentales

Se han realizado distintas pruebas en el laboratorio para comprobar el correcto funcionamiento de la aplicación y estudiar el posible margen de error que se obtiene usando el método de sintonización propuesto a partir de FBGs.

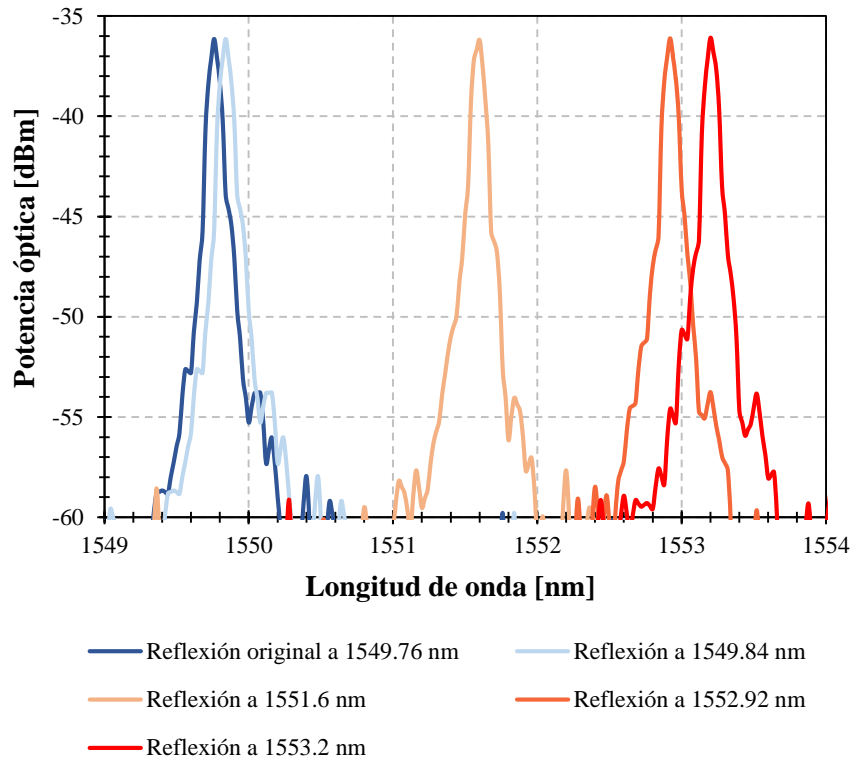


Figura 5.7. Espectro de la reflexión de la FBG sintonizado a distintas longitudes de onda. Resolución 0.05nm.

En la Fig.5.7., se puede observar el espectro original de la reflexión de la FBG a 1549.76 nm junto con otros cuatro obtenidos durante las pruebas de laboratorio. Concretamente, se obtuvo el espectro de la reflexión a 1549.84 nm cuando el usuario quería sintonizar a 1550 nm, el espectro a 1551.6 nm cuando el usuario quería sintonizar a 1551.76 nm, el espectro a 1552.92 cuando se quería sintonizar a 1552.96 nm y el espectro a 1553.2 cuando se quería sintonizar a 1553.2 nm.

A la vista de los resultados obtenidos, se puede confirmar que existe un error en longitud de onda a fondo de escala del 4.4 % aproximadamente. Además, como se ha visto el rango de sintonización que se puede conseguir con el presente método de sintonización es bastante reducido en comparación con los rangos de sintonización que ofrecen otros sistemas. Por otra parte, cabe destacar la ruptura de la fibra que tuvo lugar debido a que al sujetar la parte superior con una pieza metálica y al estar en contacto con la placa calefactora la parte inferior, la dilatación hacía que se presionara la fibra en el interior y se rompiera.

Debido a la ruptura de la red de Bragg que se acaba de mencionar, junto con la inexistencia de un número suficientes de las mismas en el laboratorio fue imposible incorporar el presente



sistema de sintonización junto con la fuente de luz multilambda propuesta quedando abierta una futura línea de investigación.

Notar que el sistema de sintonización sólo permitirá al usuario sintonizar hacia longitudes de onda mayores que la longitud de onda central de la red de Bragg, debido a la limitación impuesta por la placa calefactora (carece de sistema de refrigeración).

Capítulo 6

Conclusions and future research lines

6.1 Conclusions

In this bachelor thesis, the development of a multiwavelength ring light source configuration has been carried out. Subsequently, its tuning capacity has been studied too.

The proposed scheme allows controlling the gain of each emission line independently, reaching good equalization of the system output.

The use of multiplexers and demultiplexers facilitates the whole system scalability by simply replacing the initial ones by others with higher number of channels. Besides, this type of devices are adapted to standardized channels by the International Telecommunication Union (ITU).

System stability has been studied in terms of the coupler used to close the ring configuration, obtaining a stable system with power fluctuations of 0.1 dB using the coupler whose coupling coefficient is 90:10.

The power evaluation shows that a high filtering of the spectrum injected in the system produces high level of output power.

A low cost solution is presented due to the use of a broadband light source instead of a pump laser in order to provide power to the ring configuration. Other reason is the use of FBGs for both selecting operation wavelengths of the multiwavelength light source and providing tuning capacity

The temperature control system allows obtaining tuning ranges of 3.6 nm from the central wavelength at room temperature.

Personally, I must say that the realization of this work has meant a big contribution to my training as communication systems engineer. Not only I have been able to deepen and broaden the theoretical knowledge acquired during the degree about optical communications, but I have also acquired practical training in the optoelectronics laboratory, which I lacked of it.

6.2 Future research lines

Some doors have been left open to future research lines because of the lack of certain optical devices during the development of this bachelor thesis. Among them are:

The study of the system stability using a variable coupler that allows using a wider range of coupling coefficients, such as 95:5, 70:30, etc. In order to determine if there is a better configuration than the one proposed in this paper.

Including the tuning system proposed in this thesis with the multiwavelength light source developed, giving rise to the study of two different solutions.

To carry out the first solution would be necessary to have enough FBGs and an optical switch. The last one would allow choosing the emission wavelength that is wanted to tune among all existing emission lines. It would also include a small extension of the here proposed LabVIEW application in order to control the optical switch.

The second solution, would be to have a temperature control system for each FBG. In addition, making a modification of the application proposed here in order to allow the tuning of the whole spectrum at the same time and not only of one wavelength, would be necessary.

It would be interesting to have a hot plate that supports higher temperatures than 350°C in order to see the real tuning range that would be obtained and also a cooling system that would allow tuning towards lower wavelengths than the original and at the same time it would reduce the time of tuning.

Capítulo 7

Historia del proyecto

7.1 Estructura del documento

En el capítulo 1 se realiza una breve introducción en inglés con el fin de centrar la temática del presente trabajo fin de grado.

En el capítulo 2 se realiza un análisis de las distintas soluciones desarrolladas en el campo de las fuentes de luz multilambda, comparando las ventajas y desventajas que ofrecen cada una de ellas. Además, se presenta la solución escogida en el presente proyecto así como sus pros y contras.

En el capítulo 3 se hace una breve descripción de los fundamentos teóricos, de los distintos dispositivos ópticos empleados para el diseño de la fuente de luz multilambda.

En el capítulo 4 se exponen tanto el proceso de desarrollo de la fuente de luz multilambda, como los resultados experimentales recogidos durante las sesiones de laboratorio, realizando un análisis de los mismos para determinar determinadas características del sistema como la estabilidad.

En el capítulo 5 se realiza un estudio de la capacidad de sintonización usando redes de difracción de Bragg, analizando el punto de vista teórico así como el experimental. Para ello, se desarrollará una pequeña aplicación en LabVIEW.

En el capítulo 6 se explican las principales conclusiones extraídas de la realización del presente trabajo, así como las futuras líneas de trabajo que quedarán planteadas para su mejora y ampliación.

En el capítulo 7 se exponen la estructura del trabajo realizado y la planificación de la gestión del tiempo utilizado para llevarlo a cabo.

En el capítulo 8 se desglosa en distintos capítulos el presupuesto de ejecución.

En el capítulo 9 se comentan algunas normativas importantes que conciernen la temática del presente trabajo fin de grado. Concretamente una normativa de clasificación de fuentes de luz tanto coherentes como la desarrollada en el presente proyecto, como de las fuentes de luz láser que se han utilizado durante el desarrollo del presente proyecto que es conveniente haber tenido presente.

7.2 Planificación del proyecto

A continuación, se expone la planificación seguida durante el desarrollo del proyecto con el fin de justificar su tiempo de realización. El proceso se ha dividido principalmente en 4 fases:

Investigación: consiste en la búsqueda de la información teórica sobre la temática del proyecto, esto es, la situación actual de las comunicaciones ópticas, sus actuales líneas de investigación y los conceptos necesarios para llevar a cabo la realización del presente trabajo, prestando especial atención a los láseres con el fin de conocer los avances acontecidos hasta el momento y sus posibles desarrollos.

Desarrollo de la solución propuesta: periodo de familiarización con la instrumentación de laboratorio necesaria para el desarrollo de la solución propuesta, estudio de las características propias de cada uno de los dispositivos ópticos que integrarán el sistema y finalmente estudio de características parte del montaje final del dispositivo completo y su posterior estudio del correcto funcionamiento en base a las expectativas teóricas.

Documentación: elaboración de la memoria que documenta todo el proceso.

Presentación de la solución: elaboración de la presentación que se utilizará como soporte durante la defensa del presente trabajo.

En la Fig.7.1., se muestra el diagrama de Gantt con el reparto de días del trabajo realizado. Ha de tenerse en cuenta que aunque la planificación incluía sólo los días laborables, durante la realización del trabajo fueron bastantes los días no laborables utilizados para el desarrollo del mismo. A su vez resaltar que la dedicación en horas no siempre fue constante, dándose días de dedicación completa y otros muchos de dedicación parcial debido entre otras cosas a la compaginación de la realización del proyecto con las horas lectivas.

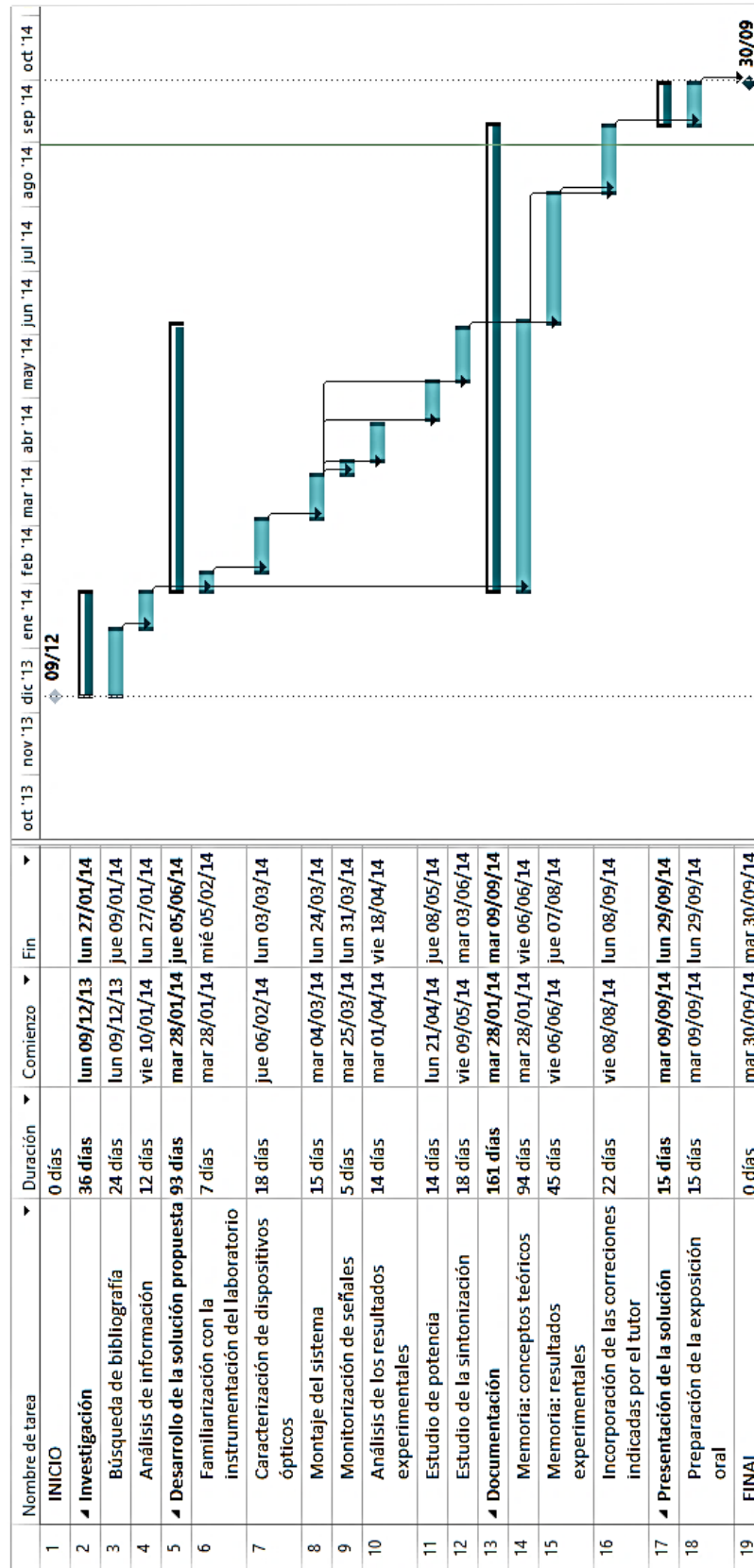


Figura 7.1. Diagrama de Gantt del proyecto.

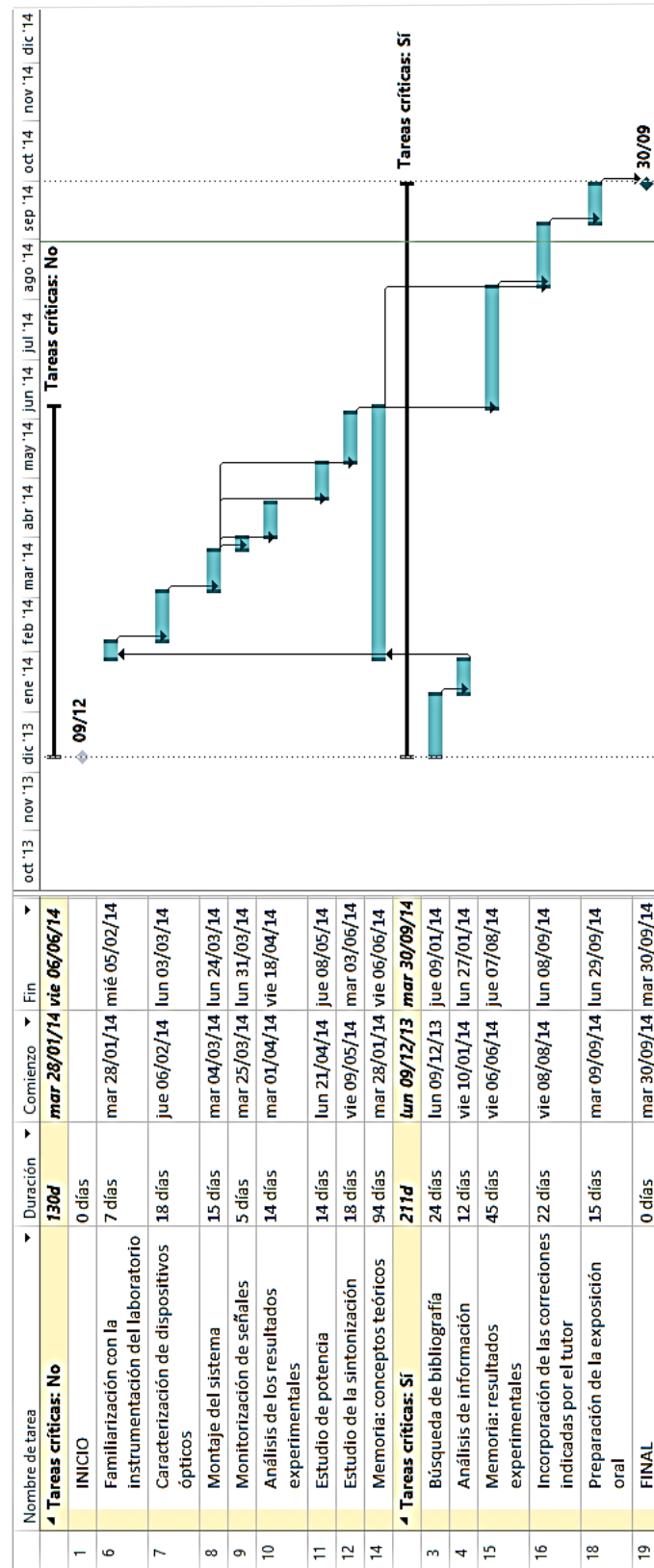


Figura 7.2. Tareas críticas del proyecto.

Capítulo 8

Presupuesto

El presente presupuesto realiza una estimación aproximada del coste de ejecución del sistema propuesto para un usuario. En él se consideran tanto el coste del material del sistema, la instrumentación y los equipos informáticos, como el coste del personal implicado en su desarrollo.

CAPÍTULO 1. MATERIAL DEL SISTEMA

| Nº. | Ud. | Descripción | Precio | Importe |
|-----|-----|--|--------|---------|
| 1 | Ud. | Acoplador estándar 2x2 de la marca Go4Fiber, tipo de fibra monomodo 9/125 mm, longitud de onda de operación 1550 nm, coeficiente de acoplo 50/50, pérdidas de inserción menores de 3.6 dB, directividad mínima de 55 dB, dimensiones L x A x A: 90 x 14 x 8.5 mm, temperatura de trabajo de -40 a 85°C, 4 conectores FC/APC. | 141.43 | 141.43 |
| 1 | Ud. | CWDM Multiplexor monomodo de 4 canales de la marca Accelink, longitudes de onda de operación: 1510, 1530, 1550 y 1570 nm, pérdidas de inserción máximas en la banda de paso completa de 0.85 dB, directividad mínima de 50 dB, temperatura de trabajo de -5 a 65°C, conectores FC/APC. | 289.60 | 289.60 |
| 1 | Ud. | CWDM Demultiplexor monomodo de 4 canales de la marca Accelink, longitudes de onda de operación: 1510, 1530, 1550 y 1570 nm, pérdidas de inserción | | |

| | | | | |
|----|------|---|--------|--------|
| | | máximas en la banda de paso completa de 1.13 dB, directividad mínima de 50 dB, temperatura de trabajo de -5 a 65°C, conectores FC/APC. | 254.04 | 254.04 |
| 14 | Uds. | Adaptadores FC para fibra monomodo de la marca Go4Fiber, con carcasa metálica de tipo cuadrado, pérdidas de inserción máximas de 0.2 dB, temperatura de trabajo de -40 a 80°C. | 1.40 | 19.6 |
| 1 | Ud. | Circulador óptico monomodo de tres puertos de la marca Optilink, con rango espectral de operación que va de los 1525 a los 1565 nm, pérdidas de inserción máximas 0.52 dB en la transmisión del puerto 1 al puerto 2 y 0.55 dB en la transmisión del puerto 2 al puerto 3, temperatura de trabajo de 0 a 70°C, conectores FC/APC. | 539.40 | 539.40 |
| 1 | Ud. | Circulador óptico monomodo de tres puertos de la marca Thorlabs, con rango espectral de operación que va de los 1525 a los 1610 nm, pérdidas de inserción máximas 0.7 dB en la transmisión del puerto 1 al puerto 2 y 0.66 dB en la transmisión del puerto 2 al puerto 3, temperatura de trabajo de 0 a 70°C, conectores FC/APC. | 565.50 | 565.50 |
| 2 | Uds. | Atenuadores ópticos variables de la marca Thorlabs, tipo de fibra SMF-28e (cable de 3 mm), con longitudes de onda de operación 1310/1550 nm, atenuación máxima de máxima 50 dB, pérdidas de inserción ~1.5 dB, dimensiones L x A x A: 38 x 30 x 19 mm, temperatura de trabajo de 0 a 60°C, conectores FC/APC. | 235.96 | 471.92 |
| 3 | Uds. | Redes de difracción de Bragg, tipo de fibra monomodo 9/125 mm, longitudes de onda de operación 1530,3, 1552,5 y 1549,76 nm, reflectividad 99%, conectores FC/APC. | 85.00 | 255.00 |

| | | | | |
|--|------|---|----------|-----------------|
| 1 | Ud. | Amplificador óptico semiconductor de la marca Alphion y su correspondiente placa de pruebas, trabaja en la banda C de comunicaciones, ofrece una ganancia óptica de 30 dB, corriente máxima del chip que se puede seleccionar con la placa es de 400 mA, temperatura de trabajo de 0 a 70°C, conectores FC/APC. | 1,387.65 | 1,387.65 |
| 4 | Uds. | Latiguillos híbridos FC/PC a FC/APC de la marca Thorlabs, de 1 m de longitud, tipo de fibra SMF-28e, máxima atenuación 35dB/km @ 1310 nm, apertura numérica 0,14. | 42.54 | 170.16 |
| 2 | Uds. | Latiguillos FC/APC de la marca Thorlabs, de 1 m de longitud, tipo de fibra SMF-28e, máxima atenuación 0.20 dB/Km @ 1550 nm, apertura numérica 0,14. | 51.24 | 102.48 |
| Total presupuesto parcial nº 1. Material del sistema: | | | | 4,196.48 |

CAPÍTULO 2. INSTRUMENTACIÓN

| Nº. | Ud. | Descripción | Precio | Importe |
|--|-----|---|----------|------------------|
| 1 | Ud. | Fuente de ancho espectro de la marca Agilent modelo Broadband Light Source Fibolux Multi 9SLD-Source, con rango espectral desde 1250 a 1650 nm. | 6,700.00 | 6,700.00 |
| 1 | Ud. | Controlador de temperatura de la marca Linkam modelo TP94, con una velocidad de calentamiento y enfriamiento controlado de 0,1 a 90°C/min, interfaz RS232 para permitir programación por software. | 4,000.00 | 4,000.00 |
| 1 | Ud. | Placa calefactora de la marca Linkam modelo LTS350, con una velocidad de calentamiento de 30°C/min llegando a alcanzar una temperatura máxima de 350°C, utiliza como elemento de calentamiento cobre niquelado. | 2,300.00 | 2,300.00 |
| Total presupuesto parcial nº2. Instrumentación: | | | | 13,000.00 |



CAPÍTULO 3. EQUIPOS INFORMÁTICOS

| Nº. | Ud. | Descripción | Precio | Importe |
|--|-----|--|--------|---------------|
| 1 | Ud. | Ordenador de sobremesa. | 575.00 | 575.00 |
| 1 | Ud. | Cable RS232 a USB de 1.8m de longitud. | 23.00 | 23.00 |
| 1 | Ud. | Cable con conectores IEEE-488/GPIB (General Purpose Interface Bus) de 1 m de longitud. | 234.00 | 234.00 |
| Total presupuesto parcial nº 3. Equipos y Software Informático: | | | | 832.00 |



CAPÍTULO 4. PERSONAL

| Nº | Ud. | Descripción | Precio | Importe |
|--|-------|---|--------|-----------------|
| 350 | horas | Ingeniero de telecomunicación Junior sin experiencia. | 7€/h | 2,450.00 |
| 75 | horas | Ingeniero Senior como tutor del proyecto. | 30 €/h | 2,250.00 |
| Total presupuesto parcial nº 4. Personal: | | | | 4,700.00 |



TOTAL EJECUCIÓN

| | Importe |
|----------------------------------|----------------------|
| Capítulo 1. Material del sistema | 4,196.48 |
| Capítulo 2. Instrumentación | 13,000.00 |
| Capítulo 3. Equipos informáticos | 832.00 |
| Capítulo 4. Personal | 4,700.00 |
| TOTAL EJECUCIÓN | 22,728.48 |
| 21% IVA | 4,772.98 |
| TOTAL | 27,501.46 |

Asciende el presente presupuesto de ejecución a la cantidad de **VEINTISIETE MIL QUINIENTOS UN EUROS Y CUARENTA Y SEIS CÉNTIMOS.**

Leganés, 16 de Agosto de 2014

Fdo. Estefanía Crespo Bardera
Graduada en Ingeniería de Sistemas de Comunicaciones

Capítulo 9

Regulación

Quizás uno de los aspectos más importantes a tener en cuenta cuando se trabaja expuesto a radiaciones ópticas, es que éstas pueden ser causantes de enfermedades relacionadas con la visión y la piel. Por ello, es necesario que los fabricantes clasifiquen el grupo de riesgo de la fuente en base a diferentes normas. Los factores que principalmente se tienen en cuenta para su clasificación son la longitud de onda de emisión, el tiempo de exposición y la potencia del haz de luz. A continuación, se indica la clasificación existente para fuentes láser (UNE EN 60825-1) y fuentes no coherentes (UNE EN 62471) como las utilizadas durante el desarrollado del presente trabajo fin de grado.

| CLASE DE SISTEMA LÁSER | RIESGOS DERIVABLES |
|---------------------------|--|
| Clase 1 | No generan riesgos si se usan con normalidad. |
| Clase 1M | No generan riesgos si se usan con normalidad, pero podrían causar daño ocular si el operador emplea algún tipo de instrumento óptico de visión directa. |
| Clase 2 | Podría causar daños oculares. El riesgo de padecer daño ocular aumenta si el operador emplea algún tipo de instrumento óptico de visión directa. |
| Clase 2M | Puede causar daños oculares. El riesgo de padecer daño ocular aumenta muy notablemente si el operador emplea algún tipo de instrumento óptico de visión directa. |
| Clase 3R | La visión directa del haz es potencialmente peligrosa. EXTREMAR PRECAUCIÓN. |
| Clase 3B | La visión directa del haz es siempre peligrosa. La visión de reflexiones difusas podría según casos, ser peligrosa también. |

| | |
|----------------|---|
| | EXTREMAR PRECAUCIÓN. |
| Clase 4 | Pueden causar daños oculares y cutáneos agudos o crónicos si se entra en contacto directo, indirecto, o por reflexión, con el haz láser. EXTREMAR PRECAUCIÓN. |

Tabla 9.1. Clasificación de sistemas láser y riesgos derivados [36]

| CLASE DE FUENTE DE LUZ | RIESGOS DERIVABLES |
|--------------------------|--|
| Grupo exento | No suponen daño alguno. |
| Grupo de riesgo 1 | No representan un riesgo debido a las limitaciones normales de funcionamiento en la exposición |
| Grupo de riesgo 2 | Representan un riesgo moderado. |
| Grupo de riesgo 3 | Representa un riesgo alto incluso para exposiciones momentáneas |

Tabla 9.2. Clasificación de luz no coherente y riesgos derivados.

Existe además otro tipo de estándar que se ha tenido en cuenta durante el desarrollo del proyecto. Concretamente la las recomendaciones G.694.1 y G.694.2 que definen la estandarización de los canales para comunicaciones CWDM y DWDM, ya vista en el Capítulo 3.

Referencias

- [1] M. Durán-Sánchez, J. Hernández Rebollar, E. Kuzin, B. Ibarra-Escamilla, M. Bello-Jiménez, A. Flores-Rosas, *et al.*, "Láser de fibra con emisión dual seleccionable usando rejillas de bragg de fibra y fibra dopada con erbio," *Revista mexicana de física*, vol. 55, pp. 73-76, 2009.
- [2] L. Talaverano, S. Jarabo, S. Abad, and M. López-Amo, "FUENTE LÁSER MULTILÍNEA PARA MULTIPLEXACIÓN EN LONGITUD DE ONDA."
- [3] N. Pleros, C. Bintjas, M. Kalyvas, G. Theophilopoulos, K. Yiannopoulos, S. Sygletos, *et al.*, "Multiwavelength and power equalized SOA laser sources," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 14, pp. 693-695, 2002.
- [4] Y.-G. Han, C.-S. Kim, J. U. Kang, U.-C. Paek, and Y. Chung, "Multiwavelength Raman fiber-ring laser based on tunable cascaded long-period fiber gratings," *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol. 15, pp. 383-385, 2003.
- [5] K. K. Qureshi, H. Tam, W. Chung, and P. Wai, "Multiwavelength laser source using linear optical amplifier," *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol. 17, pp. 1611-1613, 2005.
- [6] F. J. Salgado Remacha and S. Jarabo Lallana, "Emisión multilínea en láseres de fibra óptica dopada con erbio empleando filtros sencillos," *Óptica pura y aplicada*, vol. 41, pp. 51-57, 2008.
- [7] J. D. Causado-Buelvas, N. D. Gómez-Cardona, P. Torres, and J. A. Gómez, "Láser Sintonizable En Anillo De Fibra Óptica Dopada Con Erbio," *Bistua: Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*, vol. 7, pp. 1-7, 2009.
- [8] I. T. UNION, "Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid," in *G.694.1* ed, 2002.
- [9] I. T. UNION, "Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelenth grid " in *G.694.2*, ed, 2003.
- [10] G. C. Ópticas. (2006). *Tutorial de Comunicaciones Ópticas*. Available: <http://nemesiis.tel.uva.es/images/tCO/index.htm>
- [11] J. Cho, J. Kim, D. Gutierrez, and L. G. Kazovsky, "Broadcast transmission in WDM-PON using a broadband light source," in *Optical Fiber Communication Conference*, 2007, p. OWS7.
- [12] K.-M. Choi, J.-S. Baik, and C.-H. Lee, "Broad-band light source using mutually injected Fabry-Pérot laser diodes for WDM-PON," *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol. 17, pp. 2529-2531, 2005.

- [13] L. Jin, M. Li, and J.-J. He, "Optical waveguide double-ring sensor using intensity interrogation with a low-cost broadband source," *Optics letters*, vol. 36, pp. 1128-1130, 2011.
- [14] T. Ko, D. Adler, J. Fujimoto, D. Mamedov, V. Prokhorov, V. Shidlovski, *et al.*, "Ultrahigh resolution optical coherence tomography imaging with a broadband superluminescent diode light source," *Optics Express*, vol. 12, pp. 2112-2119, 2004.
- [15] A. Unterhuber, B. Považay, K. Bizheva, B. Hermann, H. Sattmann, A. Stingl, *et al.*, "Advances in broad bandwidth light sources for ultrahigh resolution optical coherence tomography," *Physics in medicine and biology*, vol. 49, p. 1235, 2004.
- [16] GDAF, "Componentes ópticos pasivos y activos," Departamento de Tecnología Electrónica, Universidad Carlos III de Madrid, 2014.
- [17] J. A. M. Pereda, in *Sistemas y Redes Ópticas de Comunicaciones*, ed Madrid: PEARSON Prentice Hall, 2004, pp. 420-422.
- [18] M. D. M. Martínez, "Aplicación de los amplificadores ópticos de semiconductor a la fotónica de microondas," Departamento de Comunicaciones, Universidad Politécnica de Valencia, 2013.
- [19] EDN. Available: <http://www.edn.com/design/test-and-measurement/4400567/Solve-sensing-challenges-with-optical-sensors>
- [20] E. G. Valencia, "Redes de Bragg en Fibras Ópticas Microestructuradas," Universidad Nacional de Colombia, 2013.
- [21] N. A. Russo, S. B. Noriega, and R. Duchowicz, "Implementación de Sistema Óptico para Grabado de Redes de Bragg en Fibra Óptica," *Información tecnológica*, vol. 22, pp. 121-130, 2011.
- [22] V. G. Muñoz, "Contribución al análisis y procesado de señales fotónicas multibanda," Departamento de tecnología fotónica, Universidad Politécnica de Madrid, 2008.
- [23] B. Gu, M. Yin, A. P. Zhang, J. Qian, and S. He, "Optical fiber relative humidity sensor based on FBG incorporated thin-core fiber modal interferometer," *Optics express*, vol. 19, pp. 4140-4146, 2011.
- [24] W. Zhang, X. Dong, Q. Zhao, G. Kai, and S. Yuan, "FBG-type sensor for simultaneous measurement of force (or displacement) and temperature based on bilateral cantilever beam," *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol. 13, pp. 1340-1342, 2001.
- [25] X. Liu, X. Yang, F. Lu, J. Ng, X. Zhou, and C. Lu, "Stable and uniform dual-wavelength erbium-doped fiber laser based on fiber Bragg gratings and photonic crystal fiber," *Optics express*, vol. 13, pp. 142-147, 2005.

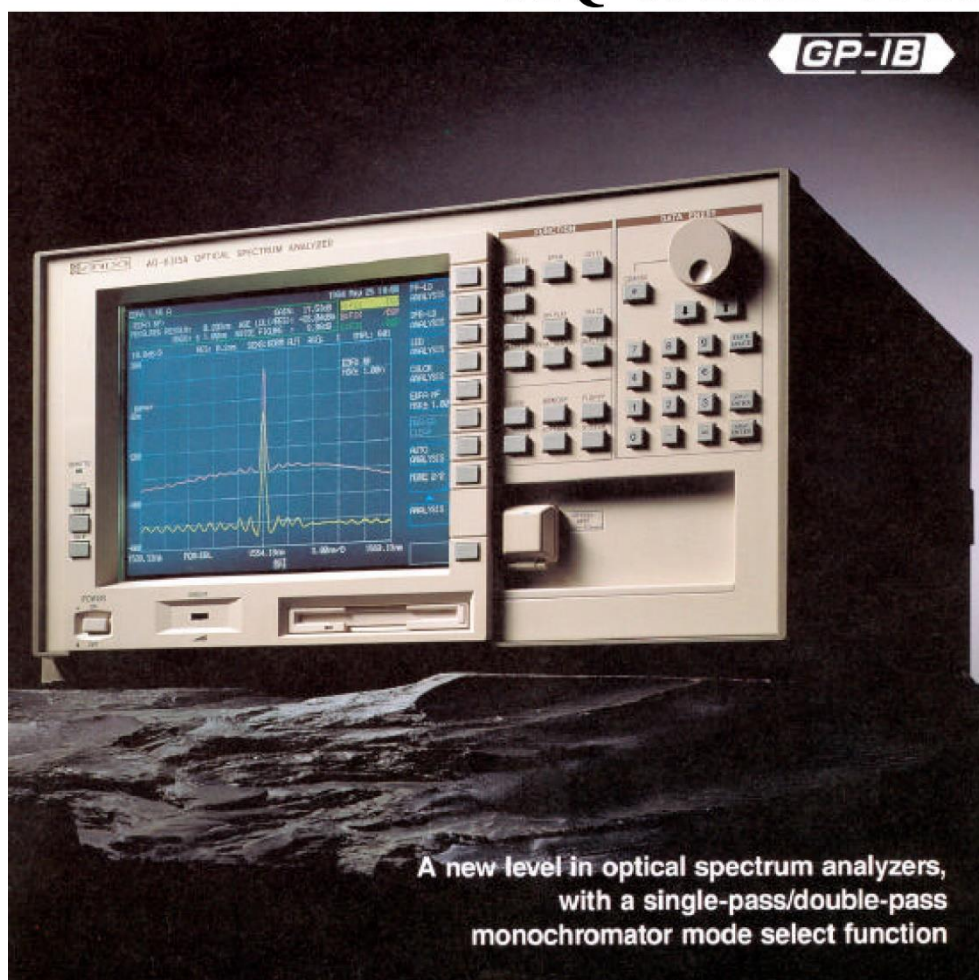
- [26] J. Mandal, S. Pal, T. Sun, K. T. Grattan, A. T. Augousti, and S. A. Wade, "Bragg grating-based fiber-optic laser probe for temperature sensing," *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol. 16, pp. 218-220, 2004.
- [27] T. Cullen, H. Rourke, C. Chew, S. Baker, T. Bricheno, K. Byron, *et al.*, "Compact all-fibre wavelength drop and insert filter," *Electronics Letters*, vol. 30, pp. 2160-2162, 1994.
- [28] S. Li, N. Ngo, S. Tjin, P. Shum, and J. Zhang, "Thermally tunable narrow-bandpass filter based on a linearly chirped fiber Bragg grating," *Optics letters*, vol. 29, pp. 29-31, 2004.
- [29] S. Harun, S. Low, P. Poopalan, and H. Ahmad, "Gain clamping in L-band erbium-doped fiber amplifier using a fiber Bragg grating," *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol. 14, pp. 293-295, 2002.
- [30] M. C. Hauer, J. E. McGeehan, S. Kumar, J. D. Touch, J. Bannister, E. R. Lyons, *et al.*, "Optically assisted internet routing using arrays of novel dynamically reconfigurable FBG-based correlators," *Journal of lightwave technology*, vol. 21, p. 2765, 2003.
- [31] Q. Chen and P. Lu, "Fiber Bragg gratings and their applications as temperature and humidity sensors," *Atomic, Molecular and Optical Physics*, pp. 235-260, 2008.
- [32] C.-H. Lee, J. Lee, M.-K. Kim, and K. T. Kim, "Characteristics of a Fiber Bragg Grating Temperature Sensor Using the Thermal Strain of an External Tube," vol. 59, p. pp. 3188~3191, November 2011.
- [33] NATIONAL INSTRUMENTS. *Software de Desarrollo de Sistemas NI LabVIEW*. Available: <http://www.ni.com/labview/esa/>
- [34] T. B. Sousa, "Dataflow Programming Concept, Languages and Applications," Universidad de Oporto.
- [35] N. INSTRUMENTS, *LabVIEW User Manual*, 2003.
- [36] *Universidad Politécnica de Valencia. Servicio Integrado de Prevención en Riesgos Laborales*. Available: http://www.sprl.upv.es/IOP_RF_01%28a%29.htm

Anexos

A1. Hojas de especificaciones de equipos

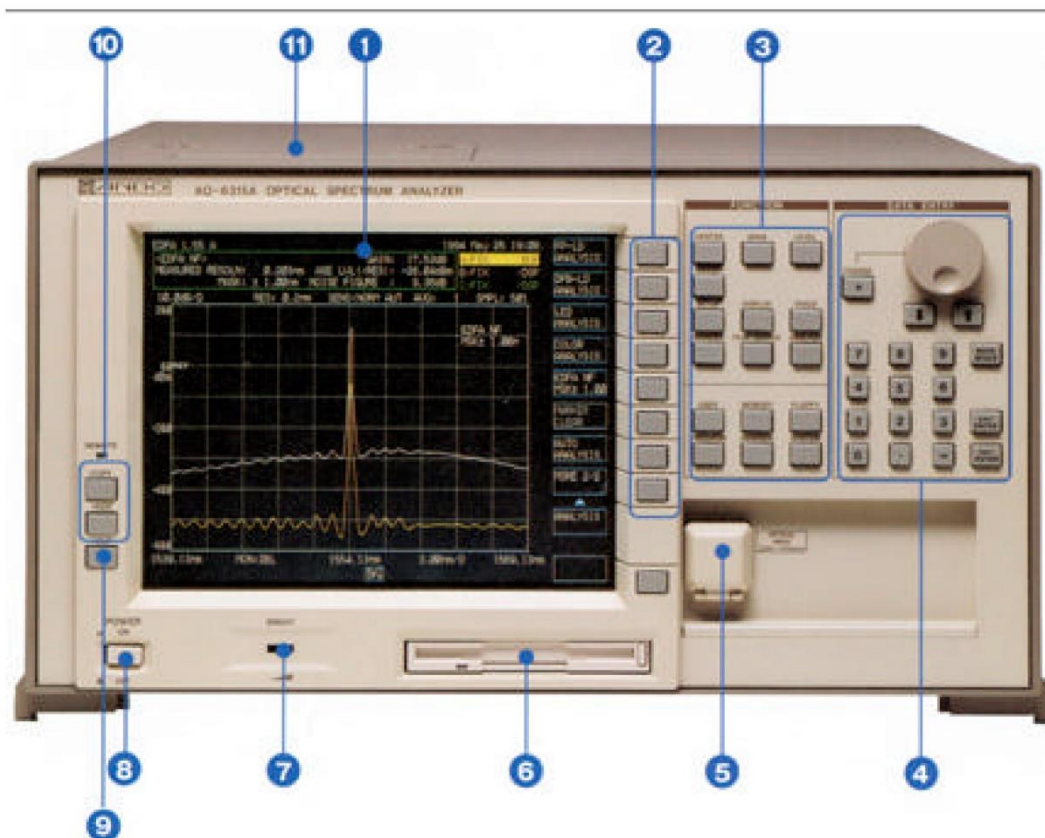
YOKOGAWA 

Optical Spectrum Analyzer AQ-6315A/-6315B



The Next Standard

Manual-Free Operation



1-9.4-inch color liquid crystal display Displays all information such as measurement waveforms, measurement conditions and measured data.

2-Function keys and window menus Used to select and execute various measurement conditions, corresponding to main functions switches.

3-Main function select switch All measurement settings

4-Data entry selection Used to input data, such as rotary knob, step key and ten-key pad.

5-Optical input connector

6-3.5-inch floppy disk drive Supports both 1.2MB and 1.44MB disks. Data can be saved on both text file and graphic file (BMP, TIFF) formats.

7-Intensity Adjust the display intensity.

8-Power switch

9-Help key Used to verify the actions of various function keys.

10-Used to output data to the internal printer and external plotter.

11-Internal printer Used to quickly output screen had copies.



Specifications

| | | Single-pass monochromator mode | Double-pass monochromator mode |
|---------------------------------------|-----------------------------|--|---|
| Applicable fiber | | SM to 800µm diameter fiber | SM, GI (50/62.5µm) |
| Measurement wavelength range | | 350 to 1750nm | |
| Wavelength span | | 0 to 1500nm | |
| Wavelength accuracy | | ±0.5nm (25 ± 5°C, 10/125 SM fiber) | |
| | | ±0.05nm (1510 to 1570nm, 10/125 SM fiber) | |
| Wavelength linearity | | ±0.02nm (1510 to 1570nm, 10/125 SM fiber)[1] | |
| Wavelength reproducibility | | ±0.005nm (1 minute) | |
| Wavelength resolution | | 0.05 to 10nm | |
| Measurement level range [2] | | -90 to +20dBm (1000 to 1600nm) -85 to +20dBm (600 to 1000nm) -75 to +20dBm (350 to 1750nm) | -85 to +20dBm (1200 to 1600nm) -80 to 20dBm (600 to 1200nm) -65 to +20dBm (350 to 1750nm) |
| Level accuracy [3] | | ±0.3dB (at 633/1310/1550nm) | |
| Polarization dependency [4] | | ±0.1dB (at 1310/1550nm) | ±0.05dB (at 1310/1550nm) |
| Linearity [5] | | ±0.05dB (0 to -40dBm), ±0.2dN (0 to -60dBm) | |
| Level scale | | 0.1 to 10dB/div. And linear | |
| Dynamic range (stray light level) [6] | | 40dB (± 1nm, 633/1152/1523nm) 35dB (± 0.5nm, 633/1152/1523nm) | 70dB (± 1nm, 633/1152/1523nm) 60dB (± 0.5nm, 633/1152/1523nm) |
| Sweep time [7] | | 0.5 s. or less (span 500nm or less) 2.5 s. or less (full span) | |
| Functions | Measurement | Automatic measurement, marker-to-marker sweep measurement, averaging, pulsed light measurement function. Power meter function | |
| | Display | 3D display, split (dual) display | |
| | Individual 3 trace memories | Max./min. hold, data calculation (addition, subtraction, division), normalize, Dominant, curve-fit display, power density display function, dBm/km, % level scale | |
| | Data analysis | Peak/bottom searches, spectral width search, SMSR search. Marker to marker power measurement function, optical amplifier NF measurement function, color analysis function, WDM analysis function, notch width measurement function | |
| | Other | Program function (200 steps×20 programs), wavelength calibration function, calendar/date function, help function, user key define function, label function | |
| Optical output [8] | | Resolution setting range: 0.05 to 10nm Insertion loss: 20dB or less (1310/1550nm) Optical fiber: GI 50/125µm | |
| Memory | FDD | Traces, analysis data and programs on 3.5-inch FD (1.2/1.44Mbyte) | |
| | Internal memory | Traces and measurement conditions (32 traces), 20 programs | |
| Data Output | Printer | High-speed built-in printer | |
| | Plotter | Direct output to XY plotter | |
| Interfaces | GP-IB | 2 ports | |
| | Other | Sweep trigger input (TTL), sample trigger input (TTL), sample trigger output (TTL) Sample enable input (TTL), 270Hz output (TTL), analog output (0-5V), Video output (VGA compatible) | |
| Display | | 9.4-inch color LCD, resolution 640×480 dots | |
| Optical input connector | | FC (standard) SC, D4, W/E, ST, DIN, etc. | |
| Power requirements | | AC100V to 120V, 200V to 240V, 48 to 83Hz, approx. 200VA | |
| Environment | | Operating temperatures: 5°C to 40°C Storage temperatures: -10°C to 50°C Humidity: 80% or less (no condensation) | |
| Dimensions and mass | | Approx. 425 (W) × 222 (H) × 450 (W) mm, approx. 30kg | |
| Accessories | | Power cord: 1ea, 3.5-inch FD: 2ea, recording paper: 2ea, instruction manual: 1ea | |

Note that device adapters, quartz cells for liquid measurement, parallel beam mounts, and white light sources are optional. Please consult with your vendor separately.

*These specifications are for products delivered later than October 1997

NOTE:

[1] After power-on and more than two hours of warm-up, within 24 hours from wavelength calibration with 1523nm HE-NE laser.

[2] At 25 ± 5°C. Resolution 0.5nm or more.

[3] 10/125 SM fiber, 25 ± 5°C, input level -30dBm or more

[4] 10/125 SM fiber, 25 ± 5°C, resolution 0.5nm or more

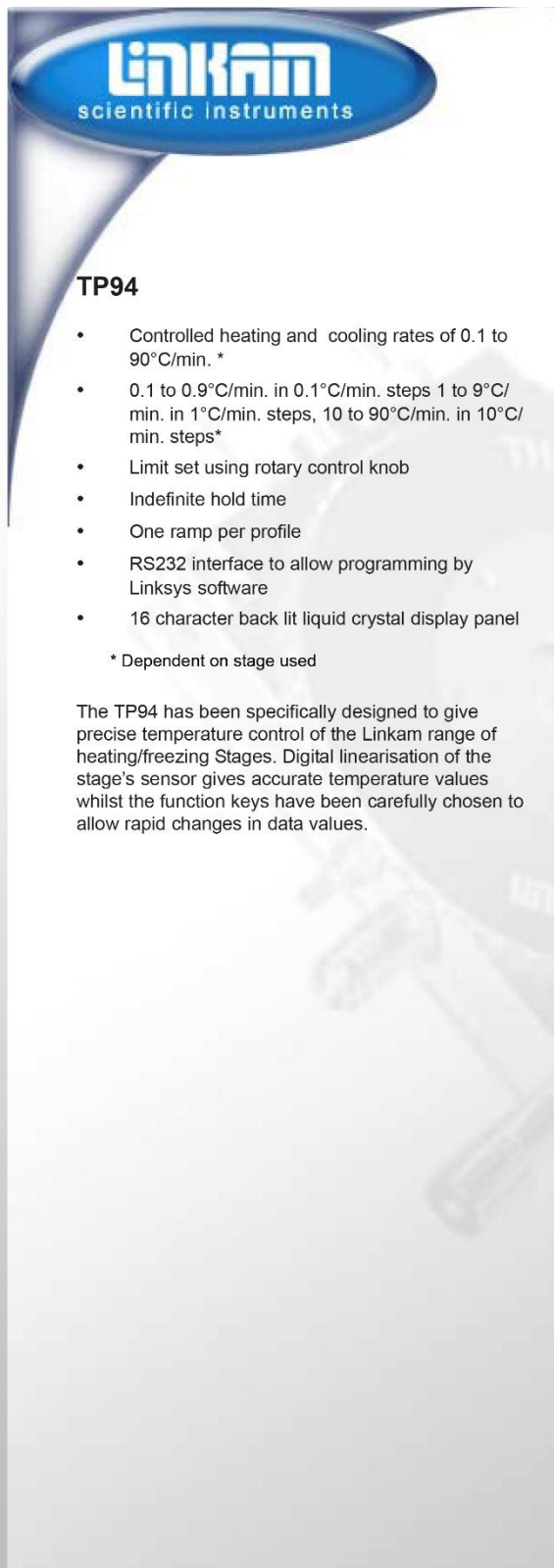
[5] 25 ± 5°C, sensitivity HIGH 3.

[6] 10/125 SM fiber, 25 ± 5°C, resolution 0.05nm, excluding high-order and low-order harmonics

[7] Single-trace display, sampling points: 501, sensitivity NORMAL HOLD. Average time: 1, no changes of diffraction order within sweep range except the full span

[8] AQ6315B only

Specifications are subject to change without notice.



TP94

- Controlled heating and cooling rates of 0.1 to 90°C/min. *
- 0.1 to 0.9°C/min. in 0.1°C/min. steps 1 to 9°C/min. in 1°C/min. steps, 10 to 90°C/min. in 10°C/min. steps*
- Limit set using rotary control knob
- Indefinite hold time
- One ramp per profile
- RS232 interface to allow programming by Linksys software
- 16 character back lit liquid crystal display panel

* Dependent on stage used

The TP94 has been specifically designed to give precise temperature control of the Linkam range of heating/freezing Stages. Digital linearisation of the stage's sensor gives accurate temperature values whilst the function keys have been carefully chosen to allow rapid changes in data values.



The TP94 Temperature Controller

The TP94 is a low cost controller capable of performing a single ramp including: Specified rate of heating and cooling, a limit temperature and an indefinite hold time.

It is also possible to download software upgrades from email via the RS232 cable supplied.

Linkam Scientific Instruments Ltd ·
info@linkam.co.uk
www.linkam.co.uk
(+44)(0) 1737 363 476.
FAX (+44)(0) 1737 363 480



Linkam Scientific Instruments

LTS350 and LTS420 Systems

The LTS stages are easy to use heating and cooling system, with fast heating rates up to 50°C/min and excellent thermal stability from –196°C to either 350 or 420°C. With a heated sample area of 53mm x 43mm, and swing-out lid it is ideal for larger samples, and can be used with samples mounted on standard microscope slides.

Features and Benefits

- Swing-out lid for easy sample exchange
- Larger Samples—microscope slides
- For Reflected and Transmitted light studies
- 15mm sample translation in X and Y
- Can be supplied with a range of different windows for Raman, FTIR, UV and x-ray work.

The LTS350/420 sample chamber is gas tight and features gas valves to enable purging with inert gas or flow of humidified air.

The stage consists of a large area temperature controlled element with a platinum resistor sensor embedded close to the surface for accurate temperature measurements.

Samples can be quickly characterized by heating to within a few degrees of the required temperature at a rate of up to 40°C/min with no overshoot, then slowed down to a few tenths of a degrees per minute to closely examine sample changes. The entire experiment can be saved as an online plot or exported to a spreadsheet application (when using Linksys 32X software).

The LTS420 can be supplied with a range of different windows for Raman, FTIR, UV and x-ray work.

System Options

LTS350 or 420

The difference between LTS350 and 420 is the rate of heating: 30C/min compared to 50C/min and maximum temperature of 350C compared to 420C. The LTS420 uses a pure silver heating element compared to the nickel plated copper element of the LTS350. This means it has a faster response time to change in temperature.

T95-LinkPad or T95-Linksys

The T95 LinkPad has an LCD touchscreen data input display and can be used as a standalone system controller.

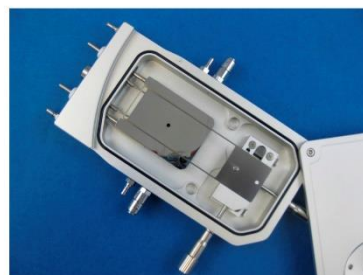
The T95-LinkSys is a PC computer interface controller and requires Linksys 32 control software (supplied) to input a temperature profile. It cannot be used standalone.

Cooling

For fast controlled cooling between +100°C to a minimum –196 °C choose the LNP95 liquid nitrogen cooling system. The LNP95 cooling pump communicates with the T95 system controller and varies the pump speeds to give a precise flow of liquid nitrogen from the 2L Dewar (supplied), to enable cooling speeds from 0.01 to 30°C/min. (All fittings and Dewar are supplied with the pump).



The LTS420 heating and freezing stage. Temperature Range –196°C to +420°C



LTS420 with Lid open showing the large area heating block and holder for a standard (76mm x 26mm) microscope slide



Analysa Dynamix System with LNP95 cooling system



Linkam Scientific Instruments

Specifications

- Temperature Range -196°C to 350 or 420°C
- Sample area of 53.5x43mm
- 32 Ramp temperature profile programming
- 15mm XY manipulation as standard
- Sample holder for standard 76x26mm microscope slides
- Gas tight chamber for atmospheric control
- Swing out lid for easy sample loading
- Can be used with transmitted or reflected light
- Mounts directly to microscope table or substage
- Stage body size: 160x80x24mm
- 100 Ohm platinum sensor
- Temperature stability <0.1°C
- Inner lid to increase temperature stability
- Direct injection of coolant into block
- Highly conductive metal for improved heat transfer
- Minimum Heating Rate 0.01°C/min
- Maximum heating rate of 50°C/min (dependent on LTS stage type)
- Response time of <1 second at 5°C/min at 50°C
- Objective lens minimum working distance: 6mm
- Condenser lens minimum working distance: 13.2mm

Read on to see what you need for the complete Linkam temperature control solution.

info@linkam.co.uk

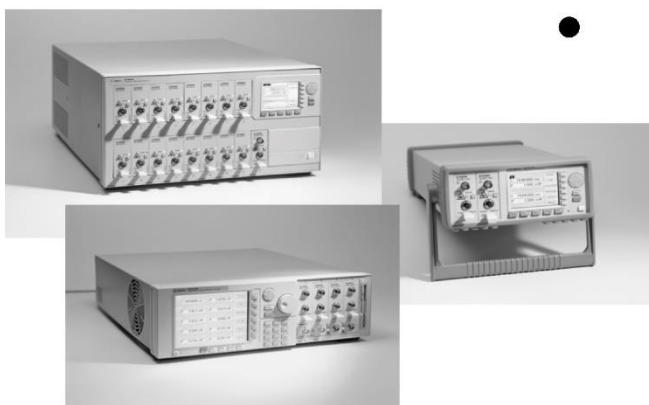
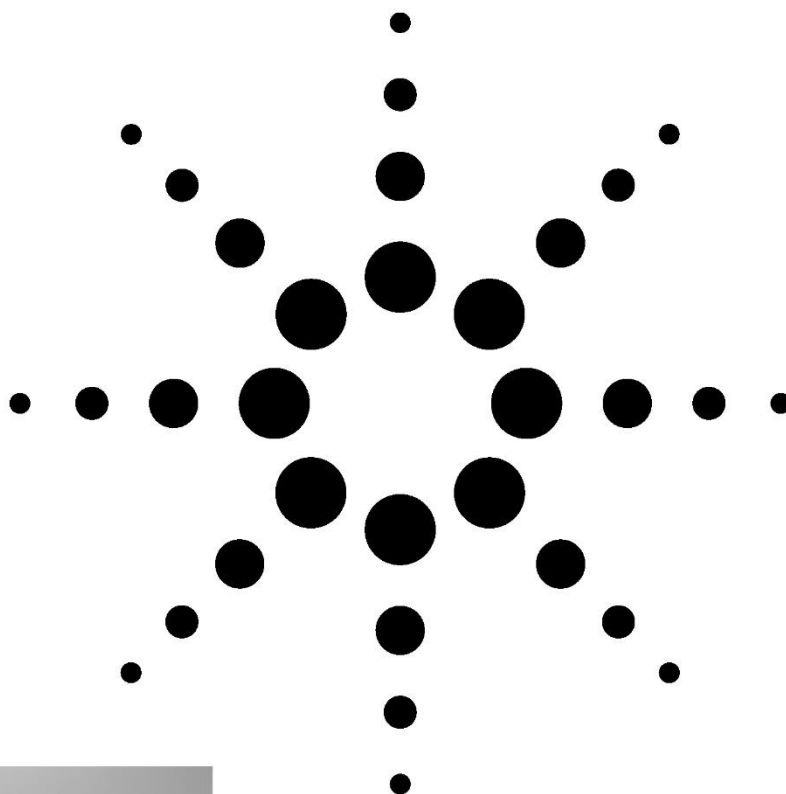
www.linkam.co.uk

tel. +44(0)1737 363 476



Agilent 8163B Lightwave Multimeter
Agilent 8164B Lightwave Measurement System
Agilent 8166B Lightwave Multichannel System

Technical Specifications
May 2003



Agilent Technologies



Agilent 8163B Mainframe

The Agilent lightwave multimeter system includes the mainframe and a variety of plug-in modules, suited for set-ups requiring:

- single or dual channel power meters
- single or dual wavelength fixed or tunable sources
- loss test sets
- return loss test sets

Specifications

| | |
|--|---|
| Display | Graphical active color display 300 x 240 points visible, 4 updates per second |
| Display resolution (power meters) | 0.0001dB/dBm, 0.01pW to 10pW (depending on power meter) , up to 6.5 digits (user definable) |
| Compatibility | The Agilent 8163B mainframe supports all HP 8153A Series and Agilent 8163A & B Series modules. ¹ |
| Trigger | True synchronous on all channels. Max. 100 kHz for triggering and 1 MHz (50% duty cycle) for external digital modulation. |
| Environmental Storage temperature Operating temperature Humidity | -40°C to +70°C 0°C to +45°C <95% rH from 0°C to 55°C The products are designed for pollution degree 2 The maximum operation altitude is 2000m |
| Power | AC 100 – 240 V \pm 10%, 50 - 60Hz \pm 5%, 120VA max. |
| Dimensions (Height x Width x Length) | 88mm x 213mm x 380mm (3.5" x 8.4" x 15") |
| Weight | net 4.200kg (9.3lbs), shipping 6.5kg (14.5lbs) |
| GPiB capability | All modes and parameters accessible via GP-IB interface |
| GPiB interface function codes² | SH1, AH1, T6, L4, SR0, RL1, PP0, DC1, DT0, C0. SCPI Standard |
| GPiB interface performance | Max. 300 kB/sec (burst data rate during read of 12001 data points from power meter) |
| Parallel Printer Interface | Centronics |
| RS232 Interface: max. baud rate | 115200 bps |
| Number of modules | 2 Modules |
| Ordering information Agilent 8163B Lightwave Multimeter Option 908 Rack mount kit 08163-44101 Filler panel for empty slots | |

¹ Agilent 8163B Series modules are NOT compatible with the HP 8153A Lightwave Multimeter.

² For code compatibility to the HP 8153A Lightwave Multimeter please refer to the mainframe's Programming Guide, part number 08764-91026.

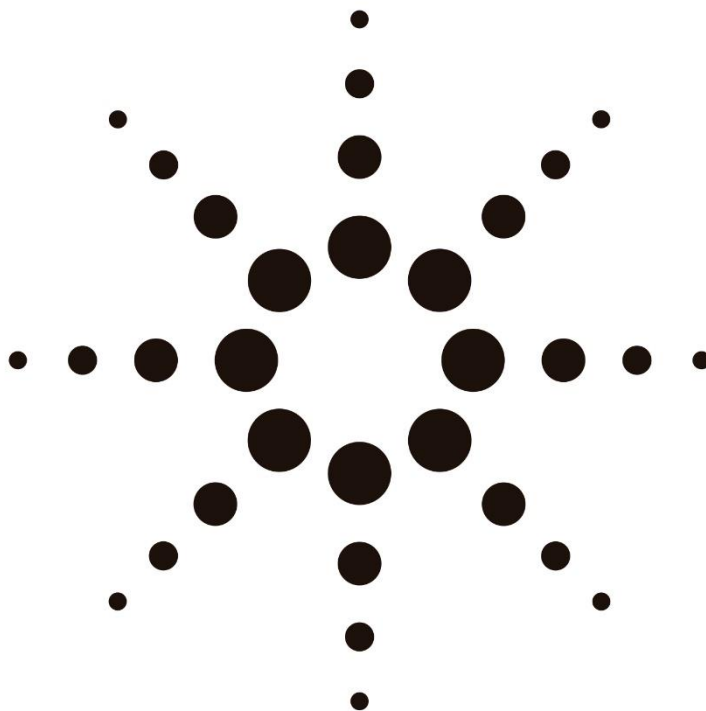


Agilent 81689A / 81689B / 81649A

Compact Tunable Laser Modules

Technical Specifications

February 2002



The 81689A, 81689B, 81649A compact tunable laser modules offer superior performance now also in the compact module class. As they are tunable with continuous output power, they are the most flexible stimulus for the test of optical amplifiers, DWDM components as well as for the test of complete DWDM systems.



Agilent Technologies



81689A, 81689B, 81649A Compact Tunable Laser for Multi-channel test applications

| | Agilent 81689A | Agilent 81689B | Agilent 81649A |
|---|--|--|--|
| Wavelength range | 1525 nm to 1575 nm | 1525 nm to 1575 nm | 1570 nm to 1620 nm |
| Wavelength resolution | 0.01 nm, 1.25 GHz at 1550 nm | 0.01 nm, 1.25 GHz at 1550 nm | 0.01 nm, 1.17 GHz at 1595 nm |
| Absolute wavelength accuracy (typ.) ^[1] | ± 0.3 nm | ± 0.3 nm | ± 0.3 nm |
| Relative wavelength accuracy ^[1] | ± 0.3 nm | ± 0.15 nm | ± 0.15 nm |
| Wavelength repeatability ^[1] | ± 0.05 nm | ± 0.05 nm | ± 0.05 nm |
| Wavelength stability (typ., over 24 h at constant temperature) ^[1] (typ., over 1 h at constant temperature) ^[1] | ± 0.02 nm ± 0.005 nm | ± 0.01 nm ± 0.005 nm | ± 0.01 nm ± 0.005 nm |
| Tuning speed (typ.) | < 10 sec/ 50 nm | < 10 sec/ 50 nm | < 10 sec/ 50 nm |
| Linewidth (typ.) ^[2] with Coherence Control ON (typ.) ^[2] | 20 MHz --- | < 20MHz > 100MHz | < 20MHz > 100MHz |
| Output power (continuous power on during tuning) | ≥ 6 dBm (1525 –1575nm) | ≥ 10 dBm (1525 –1575nm) | ≥ 6 dBm (1570 –1620nm) |
| Minimum output power | -3 dBm | 0 dBm | -3 dBm |
| Power stability (at constant temperature) ^[3] | ± 0.03 dB over 1 hour, typ. ± 0.06 dB over 24 hours | ± 0.015 dB over 1 hour, typ. ± 0.0075 dB over 1 hour, typ. ± 0.05 dB over 24 hours | ± 0.015 dB over 1 hour, typ. ± 0.0075 dB over 1 hour, typ. ± 0.05 dB over 24 hours |
| Power repeatability (typ.) ^[3] | ± 0.02 dB | ± 0.02 dB | ± 0.02 dB |
| Power linearity | ± 0.1dB | ± 0.1dB | ± 0.1dB |
| Power flatness versus wavelength | ± 0.3 dB | ± 0.2 dB | ± 0.2 dB |
| Side-mode suppression ratio (typ.) ^[2] | > 40 dB (1525 – 1575 nm at 0 dBm) | > 45 dB (1525 – 1575 nm at ≥ 3 dBm) | > 45 dB (1570 – 1620 nm at ≥ 0 dBm) |
| Signal to source spontaneous emission ratio (typ.) ^[4] | ≥ 39 dB/ nm (1525 –1575 nm at 6 dBm) | ≥ 44 dB/ nm (1525 –1575 nm at 10 dBm) | ≥ 42 dB/ nm (1570 – 1620 nm at 6 dBm) |
| Relative intensity noise (RIN, typ.) | < -137 dB/Hz (100 MHz – 2.5 GHz, at +3 dBm) | < -137 dB/Hz (100 MHz – 2.5 GHz, at +7 dBm) | < -137 dB/Hz (100 MHz – 2.5 GHz, at +3 dBm) |
| Dimensions | 75 mm H, 32 mm W, 335 mm D (2.8" x 1.3" x 13.2") | 75 mm H, 32 mm W, 335 mm D (2.8" x 1.3" x 13.2") | 75 mm H, 32 mm W, 335 mm D (2.8" x 1.3" x 13.2") |
| Weight | 1 kg | 1 kg | 1 kg |

^[1] At CW operation. Measured with wavelength meter based on wavelength in vacuum.

^[2] Measured by heterodyning method.

^[3] 500 ms after changing power.

^[4] Measured with optical spectrum analyzer at 1 nm resolution bandwidth.

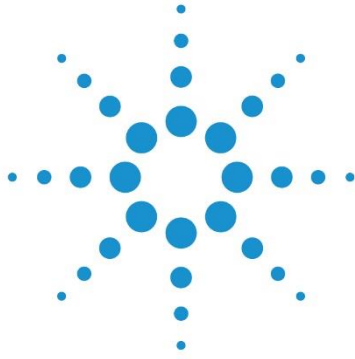
Listed options

Option 021: standard single mode fiber,
straight contact output connector

Option 022: standard single mode fiber,
angled contact output connector

Option 071: polarization maintaining
fiber, straight contact output connector

Option 072: polarization maintaining
fiber, angled contact output connector



Agilent 81663A DFB Laser 8165xA Fabry-Perot Lasers

Data Sheet

Introduction

The Agilent 81663A high power DFB Laser Source modules are best suited for optical amplifier test and DWDM system test applications.

The Agilent Fabry-Perot Laser Sources are available as single or dual wavelength sources, are insensitive to back reflections, and are stabilized for short and long term applications.

The DFB and FP Laser Source modules are part of the flexible Agilent Lightwave Solution platform and have a future-proof design that allows for easy firmware upgrades.



Agilent Technologies

Technical Specifications

Fabry-Perot source module specifications (high-power modules, 13 dBm)

Specifications apply to the end of a 2 m long fiber cable (as specified under fiber type) with Diamond® HMS-10/Agilent connectors attached. All specifications are valid for an attenuation setting of 0.0 dB. All modules require straight output connectors.

| | Agilent 81655A | Agilent 81656A | Agilent 81657A |
|---|---|-------------------|-------------------------|
| Type | Fabry-Perot Laser | | |
| Center wavelength ¹ | 1310 nm ±15 nm | 1550 nm ±15 nm | 1310/1550 nm ± 15 nm |
| Fiber type | Standard single-mode 9/125 μm | | |
| Spectral bandwidth (rms) ^{1, 2} | < 5.5 nm | < 7.5 nm | < 5.5nm/7.5 nm |
| Output power | > +13 dBm (20 mW) | | |
| CW power stability ^{3, 4} | | | |
| Short term (15 minutes) | < ± 0.005 dB Typical < ±0.003 dB with coherence control active | | |
| Long term (24 hours) | Typical ± 0.03 dB | | |
| To back reflection (RL ≥ 14 dB) | Typical ± 0.003 dB | | |
| | | | |
| Dimensions (H x W x D) | 75 mm x 32 mm x 335 mm (2.8" x 1.3" x 13.2") | | |
| Weight | 0.5 kg | | |
| Recalibration period | 2 years | | |
| Operating temperature | 0 °C to 45 °C | | |
| Humidity | Non-condensing | | |
| Warm-up time | 60 minutes ³ | | |

Table 2. Technical specifications for Fabry-Perot source modules (high-power modules, 13 dBm)

1. Center wavelength is shown on display
2. RMS: root mean square
3. Warm-up time 20 min, if previously stored at the same temperature.
4. Controlled environment ($\Delta T = \pm 1$ °C)

Supplementary Performance Specifications

Internal digital

modulation mode

270 Hz, 330 Hz, 1 kHz, 2 kHz and free selection 200 Hz to 10 kHz. All output signals are pulse shaped, duty cycle 50%.

Internal coherence control for line-width broadening.

Output attenuation

The output power of all source modules can be attenuated from 0 dB to 6 dB in steps of 0.1 dB.

Laser safety information

All laser sources listed above are classified as Class 1M according to IEC 60825 1 (2001). All laser sources comply with 21 CFR 1040.10 except for deviations pursuant to Laser Notice No. 50, dated 2001-July-26.

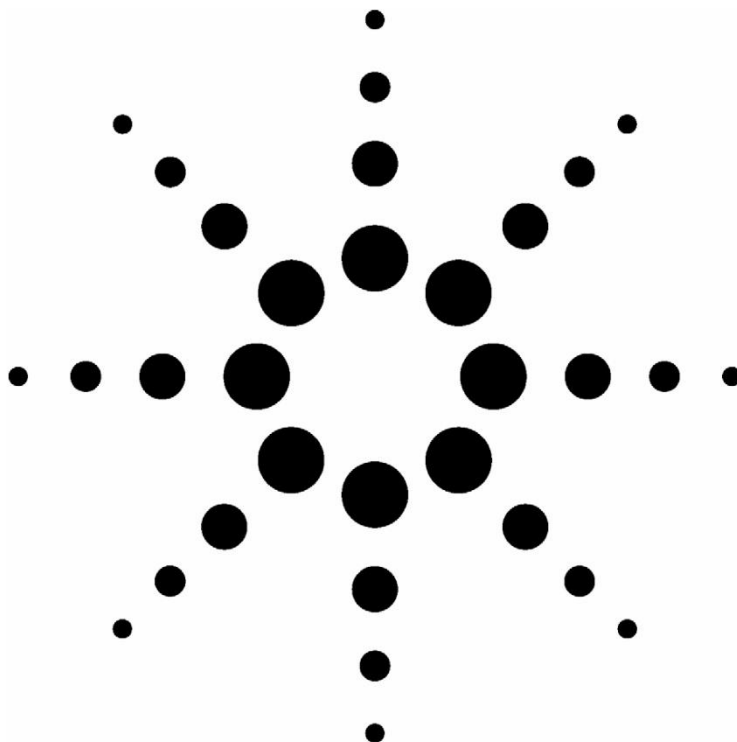


Figure 2. Laser classification label for Class 1M

Agilent 8157xA Optical Attenuators

Technical Specifications

March 2006



Agilent's 8157xA Variable Optical Attenuators are instruments that attenuate and control the optical power level of light in optical fibers.

As plug-in modules for Agilent's Lightwave Solution platform (8163A/B, 8164A/B, 8166A/B) they allow you to set the attenuation factor and/or power level manually, or remotely via a common computer interface.

Their high accuracy combined with their flexibility makes them ideal as test and measurement equipment for the modern telecommunication industry.



Agilent Technologies

Calibration Processes

Comprehensive offset functionality in the firmware enhances the calibration of the optical path in various test set-ups. There is an offset for the attenuation factor, and an independent offset for the output power level, to calibrate for losses due to the patch cords and connectors. Additionally, wavelength and offset value pairs can be stored in a table to compensate for wavelength dependent effects in the optical path of the set-up. This allows you to set the optical power level at your Device Under Test.

Calibration is even easier and more convenient if the reference power meter and the attenuator are hosted by the same mainframe: All power related offsets can be determined by a firmware function that reads a value from the reference power meter. The difference between the power value read by the reference power meter and the actual value of the attenuator is automatically stored as the offset.

Key Features

- High input powers up to 2 Watt
- Excellent wavelength flatness: typical ± 0.05 dB
- Low insertion loss: typical 0.7 dB
- Wide wavelength range: 1200 nm – 1700 nm (SM),
700 nm – 1400 nm (MM)
- High resolution: 0.001 dB
- Modular design allows up to 17 attenuators in one mainframe
- Active power control options to set power levels directly
- Comprehensive offsets allow easy calibration of the set-up
- Integrated shutter
- Agilent's versatile optical connector interfaces for all common types of connectors

Applications

- Bit error ratio test
- Characterization of transceivers, receivers, transmitters and line cards
- Test of single channel transmission systems
- DWDM channel equalization
- Loss simulation in fiber optic links
- Testing and calibrating the linearity of power meters
- Optical Amplifier Test
 - Characterization of EDFAs
 - Test of Raman amplifiers and SOAs
- Multi channel transmission system test
- Loss simulation of DWDM signals in fiber optic links



The Agilent 8157xA modules are produced to the ISO 9001 international quality system standard as part of Agilent's commitment to continually increasing customer satisfaction through improved quality control.



Variable Optical Attenuator Modules (Single Mode Fibers)

| | 81570A | 81571A |
|--|---|---|
| Connectivity | straight connector versatile interface | angled connector versatile interface |
| Fiber type | 9/125 μ m SMF28 | |
| Wavelength range | 1200 nm – 1700 nm | |
| Attenuation range | 0 – 60 dB | |
| Resolution | 0.001 dB | |
| Repeatability ^[1] | ± 0.01 dB | |
| Accuracy (uncertainty) ^{[1], [2], [3], [4]} | ± 0.1 dB (at 1550 nm) typ. ± 0.1 dB (1250 nm – 1650 nm) | |
| Settling time ^[5] | typ. 100 ms | |
| Transition speed | typ. 0.1 – 12 dB/s | |
| Attenuation flatness ^{[1], [4], [6], [8]} | ± 0.07 dB; typ. ± 0.05 dB (1520 nm < λ < 1620 nm) typ. ± 0.10 dB (1450 nm < λ < 1640 nm) | |
| Spectral ripple ^[7] | typ. ± 0.003 dB | |
| Insertion loss ^{[2], [4], [9], [10]} | typ. 0.7 dB (excluding connectors) 1.6 dB; typ. 1.0 dB (including connectors) ^[11] | |
| Insertion loss flatness ^{[1], [11]} | typ. ± 0.1 dB (1420 nm < λ < 1615 nm) ^[4] | |
| Polarization dependent loss ^{[2], [11]} | 0.08 dBpp; typ. 0.03 dBpp (at 1550 nm \pm 15 nm) | |
| Return loss ^[11] | typ. 45 dB (at 1550 nm \pm 15 nm) | typ. 57 dB (at 1550 nm \pm 15 nm) |
| Maximum input power ^[12] | +33 dBm | |
| Shutter isolation | typ. 100 dB | |
| Dimensions (H x W x D) | 75 mm x 32 mm x 335 mm (2.8" x 1.3" x 13.2") | |
| Weight | 0.9 kg | |
| Recommended recalibration period | 2 years | |
| Operating temperature | 10°C – 45°C | |
| Humidity | Non-condensing | |
| Warm-up time | 30 minutes | |

^[1] At constant operating conditions

^[2] Temperature within 23°C \pm 5°C

^[3] Input Power < +30 dBm

^[4] For unpolarized light

^[5] Step size < 1 dB, for full range: typ. 6 seconds

^[6] Relative to reference at 0 dB attenuation

^[7] Linewidth of source \geq 100 MHz

^[8] λ_{disp} set to 1550 nm; attenuation \leq 20 dB;

for attenuation > 20 dB:

add typ. 0.01 dB (α [dB] – 20) for 1520 nm < λ < 1620 nm

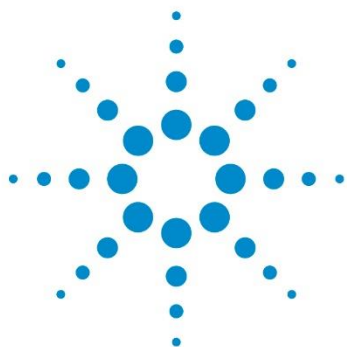
add typ. 0.02 dB (α [dB] – 20) for 1450 nm < λ < 1640 nm

^[9] For $\lambda = 1550$ nm \pm 15 nm

^[10] Add typ. 0.1 dB for $\lambda = 1310$ nm \pm 15 nm

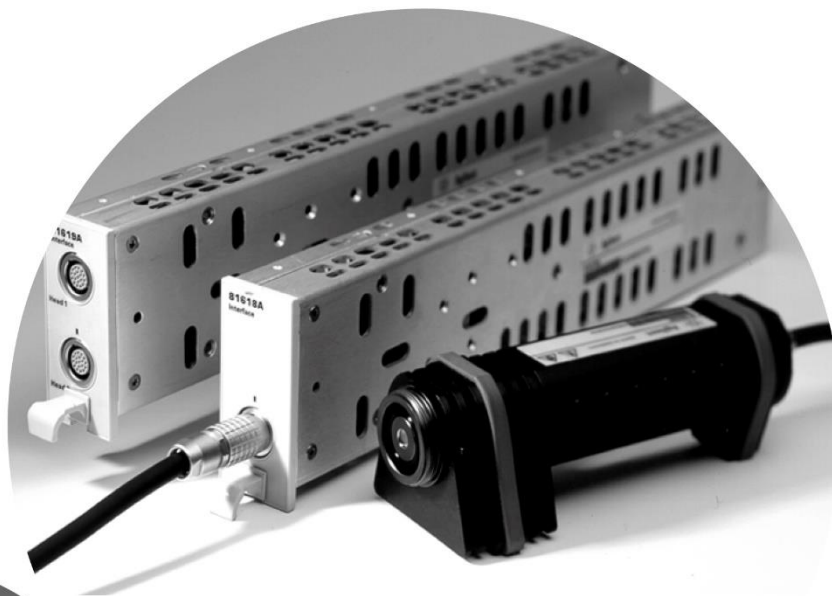
^[11] Measured with Agilent reference connectors

^[12] Agilent Technologies Deutschland GmbH assumes no responsibility for damages caused by scratched or poorly cleaned connectors.



Agilent Power Sensor Modules Agilent Optical Heads Agilent Return Loss Modules

Data Sheet



Agilent Technologies



Technical Specifications

Power sensor module specifications

| | Agilent 81635A | Agilent 81634B |
|--|---|--|
| Sensor element | InGaAs (dual) | InGaAs |
| Wavelength range | 800 nm to 1650 nm | 800 nm to 1700 nm |
| Power range | –80 dBm to +10 dBm | –110 dBm to +10 dBm |
| Applicable fiber type | Standard SM and MM up to 62.5 μ m core size, NA \leq 0.24 | Standard SM and MM up to 100 μ m core size, NA \leq 0.3 |
| Uncertainty (accuracy) at reference conditions ¹ | Typ. < $\pm 3.5\%$ ¹⁰ (800 nm to 1200 nm) $\pm 3\%$ (1200 nm to 1630 nm) | $\pm 2.5\%$ (1000 nm to 1630 nm) |
| Total uncertainty ² | Typ. $\pm 5.5\% \pm 200$ pW ^{9, 11} (800 nm to 1200 nm) $\pm 5\% \pm 20$ pW ^{8, 9} (1200 nm to 1630 nm) | $\pm 4.5\% \pm 0.5$ pW (1000 nm to 1630 nm) |
| Relative uncertainty: - due to polarization ³ - spectral ripple (due to interference) ⁴ | Typ. < ± 0.015 dB Typ. < ± 0.015 dB | < ± 0.005 dB < ± 0.005 dB |
| Linearity (power): ⁵ - at 23 °C ± 5 °C - at operating temp. range | CW –60 dBm to +10 dBm Typ. < ± 0.02 dB ⁹ (800 nm to 1200 nm) < ± 0.02 dB ⁹ (1200 nm to 1630 nm) Typ. < ± 0.06 dB ⁹ (800 nm to 1200 nm) < ± 0.06 dB ⁹ (1200 nm to 1630 nm) | CW –90 dBm to +10 dBm < ± 0.015 dB (1000 nm to 1630 nm) < ± 0.05 dB (1000 nm to 1630 nm) |
| Return loss ⁷ | > 40 dB | > 55 dB |
| Noise (peak to peak) ⁶ | Typ. < 200 pW (800 nm to 1200 nm) < 20 pW (1200 nm to 1630 nm) | < 0.2 pW (1200 nm to 1630 nm) |
| Averaging time (minimal) | 100 μ s | 100 μ s |
| Analog output | None | Included |
| Maximum safe input power | +16 dBm | +16 dBm |
| Dimensions (H x W x D) | 75 mm x 32 mm x 335 mm (2.8" x 1.3" x 13.2") | 75 mm x 32 mm x 335 mm (2.8" x 1.3" x 13.2") |
| Weight | 0.5 kg | 0.5 kg |
| Recommended recalibration period | 2 years | 2 years |
| Operating temperature | +10 °C to +40 °C | 0 °C to +45 °C |
| Humidity | Non-condensing | Non-condensing |
| Warm-up time | 20 min | 20 min |

1. Reference Conditions:

- Power level 10 μ W (–20 dBm), continuous wave (CW)
- Fiber 50 μ m graded-index, NA = 0.2
- Ambient temperature 23 °C ± 5 °C
- On day of calibration (add $\pm 0.3\%$ for aging over one year, add $\pm 0.6\%$ over two years)
- Spectral width of source < 10 nm (FWHM)
- Wavelength setting at power sensor must correspond to source wavelength ± 0.4 nm

2. Operating Conditions:

- Fiber ≤ 50 μ m, NA ≤ 0.2
- 81634B only: connectors with 2.5 mm ferrule with flat face (fiber tip offset not more than 0.3 mm from 2.5 mm cross-section) with straight or angled polish
- 81635A only: for LC connector use 81000LI adapter, not 81002LI; for MU connector use 81000MI, not 81002MI

3. Averaging time 1 s

- Only Agilent 81635A: For fiber 62.5 μ m graded-index (NA = 0.24): add $\pm 2\%$
- Within one year after calibration, add 0.3% for second year
- Operating temperature range as specified humidity: none condensing

4. All states of polarization at constant wavelength (1550 nm ± 30 nm) and constant power, straight connector, T = 23 °C ± 5 °C. For angled connector (8°) add ± 0.01 dB typ.

5. Conditions:

- Wavelength 1550 nm ± 30 nm, fixed state of polarization, constant power
- Temperature 23 °C ± 5 °C
- Linewidth of source 100 MHz
- Angled connector 8°

6. Does not include noise

- Averaging time 1 s, T = 23 °C ± 5 °C, $\Delta T \pm 1$ °C, observation time 300 s

7. Conditions:

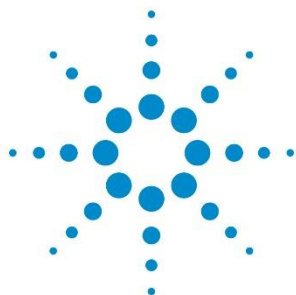
- Wavelengths 1310 nm ± 30 nm and 1550 nm ± 30 nm
- Standard single mode fiber, angled connector min 8°
- T = 23 °C ± 5 °C

8. For wavelengths > 1600 nm add $\pm 0.06\%/nm$

9. For input power > 2 mW add ± 0.02 dB

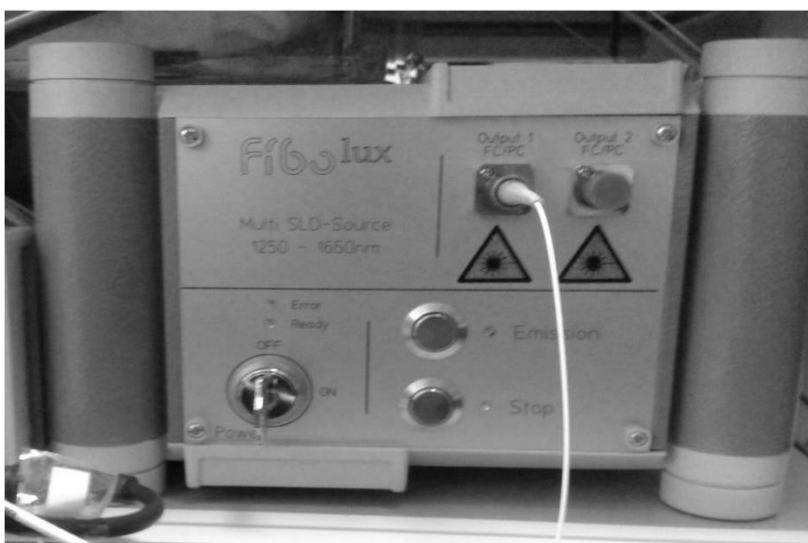
10. Add $\pm 1\%$ for wavelength 900 nm to 950 nm

11. Add $\pm 3.5\%$ for wavelength 900 nm to 950 nm



Agilent Light Source Fibolux Multi 9SLD-Source

Data Sheet



| | 9SLD |
|-------------------------|--|
| Type | SLD (Superluminescent Diode) |
| Spectral range | 1250nm – 1650 nm |
| Spectral power density | Min. -30dBm/nm@spectral range |
| Total power | Typ. 40mW |
| Power stability | ± 20 mdB@15min |
| Conector style | FC/PC |
| Environmental condition | Non condensing 5°C-35°C (operation) Non condensing -20°C-60°C (storage) |

A2. Front panel y block diagram de la aplicación de sintonización

